

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES
POR EL MÉTODO DEL RECICLAJE

PRESENTADO POR:

CARMEN ELENA RODRÍGUEZ MINEROS

JOSE ANTONIO RODRÍGUEZ MOLINA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO 2004

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :
Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :
Licda. Alicia Margarita Rivas de Recinos

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :
Ing. Mario Roberto Nieto Lovo

SECRETARIO :
Ing. Oscar Eduardo Marroquín Hernández

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :
Ing. Luís Rodolfo Nosiglia Durán

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES
POR EL MÉTODO DEL RECICLAJE

Presentado por :

CARMEN ELENA RODRÍGUEZ MINEROS

JOSE ANTONIO RODRÍGUEZ MOLINA

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente Director :

ING. JOSE TULIO PINEDA MARTINEZ

Docente Director :

ING. JOSE MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

Docente Director :
(Externo)

ING. PORFIRIO LAGOS VENTURA

San Salvador, Agosto de 2004.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. JOSE TULIO PINEDA MARTINEZ

ING. JOSE MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA

ING. PORFIRIO LAGOS VENTURA

AGRADECIMIENTOS

Los conocimientos necesarios para culminar con éxito nuestra carrera universitaria no habría sido posible sin la ayuda de:

Dios Todo Poderoso, Gracias a que siempre nos ha protegido e iluminado para la culminación de nuestra carrera, tan importante en nuestras vidas.

Al Ing. José Tulio Pineda, nuestro coordinador y a los ingenieros Porfirio Lagos y José Miguel Landaverde nuestros asesores, por que nos apoyaron para cumplir con éxito nuestra meta y por todo el apoyo y dedicación incondicional que nos brindaron.

A todos los ingenieros de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador, ya sin ayuda de ellos nosotros no habríamos terminado nuestra carrera, especialmente a los ingenieros José Ranulfo Cárcamo y Cárcamo, Edgar Gavidia, Luís Rodolfo Nosiglia por todos sus consejos acertados.

A toda la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial del Ministerio de Obras Públicas, por toda la valiosa información que nos brindaron, ya sin ella no hubiéramos podido terminar este trabajo de graduación, especialmente a los ingenieros Maria Rene Escobar y Julio Rivera por la paciencia y comprensión que nos expresaron.

Y a todas las personas que directa o indirectamente nos han ayudado.

DEDICATORIA

A DIOS todo poderoso, agradezco que me hayas permitido vivir hasta hoy, gracias a ti he logrado cumplir con uno de mis grandes sueños. Me iluminas cada día, tienes misericordia de mí y de cada una de las personas que me han acompañado en las diferentes etapas de mi vida. Te dedico este momento tan especial en mi vida y me pongo a tus pies por que sé que puedo contar contigo hoy, mañana y siempre.

Gracias Señor por mis padres **Gumercindo Rodríguez** y **Carmen Mineros** que supieron guiarme en tu camino, me inspiran a seguir, se alegran con mis logros y me aman más cuando estoy triste. Gracias por su amor, su comprensión, sus sacrificios, sus consejos acertados y su apoyo incondicional. Yo sé Señor que no pudiste darme una mejor familia que la que tengo, ya que son lo mejor que me has dado. A si mismo te agradezco por la vida de mis hermanos: **Mirna Elizabeth** y **Fernando de Jesús** que me comprenden y apoyan en todo lo que pueden y sé que me entienden y perdonan por todo el tiempo que no he podido estar a su lado, Los Amo.

Gracias Señor por cada uno de mis familiares: **Abuela Elena, hermanos/a, tías/os, primas/os, sobrinos/as** y a **Toda** la familia de José que me han adoptado como un miembro más, y me han animado a seguir siempre adelante y me demuestran su amor. Los quiero mucho a todos.

De igual manera te agradezco por mi media naranja **José Antonio** que gracias a que nos apoyamos mutuamente, hemos logrado culminar este gran anhelo, tú me haces muy feliz **TE AMO MI AMOR.**

Gracias Señor por mis **Asesores** y la ayuda que nos brindaron, a mis compañeros que nunca olvidaré y mis **amigos/as** especialmente a **Lis, Ivannia, Luis y Carmen Elena** por contar siempre con su amistad.

Por todo lo anterior Señor te doy gracias y te pido que nunca me abandones. AMEN

Carmen Elena

DEDICATORIA

A DIOS, por guiarme por el buen camino y no dejarme solo, por regalarme sus bendiciones y el conocimiento para culminar mis estudios con la entrega de este trabajo, cumpliendo así uno de mis más grandes sueños y metas.

A mi Mamá Raquel que con su esfuerzo y apoyo me impulso a seguir adelante, y yo no creo tener forma de agradecerle todo lo que hace por mi, eres una gran mujer espero que Dios te bendiga, te quiero mucho.

A mis hermanas Verónica, Patricia, Jessenia, y mi hermanito Alex, que debido a los estudios talvez no estuve con ellos siempre que pudieron haberme necesitado, más sin embargo ellos siempre estuvieron conmigo, a todos los quiero, no cambien y sigan con la fe en Dios, siempre adelante.

A mi abuelita (mamá trine), quien siempre oraba por mi cuando yo estaba lejos de su lado, se levantaba en las madrugadas y no me dejaba venir sin sus bendiciones, aprecio todo lo que hizo por mi y no sabe cuanto la quiero.

A mi demás Familia como mi tía Julia, mi tío Meme, mi Papá, mi tía Ana, Don José, que de una u otra forma siempre estuvieron conmigo brindándome su ayuda cuando lo necesitaba, se los agradezco.

A Carmen Elena, por estar a mi lado, comprenderme y con quien he logrado sacar adelante la meta de culminar nuestros estudios y este trabajo. TE AMO.

A la mamá de Carmen (niña Carmen) por apoyarnos y ayudarnos a cumplir esta meta. Se lo agradezco y que Dios la bendiga.

A todas las personas que aportaron su ayuda directa o indirectamente, amigos, primos, y demás personas. Gracias

José Rodríguez

**EVALUACIÓN Y
REHABILITACIÓN DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES
POR EL MÉTODO DEL
RECICLAJE.**

INDICE GENERAL

	Página
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA.....	xv
INTRODUCCION.....	xix
CAPITULO I: GENERALIDADES	
1.0 GENERALIDADES.....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.1.1 Reciclado en frío.....	4
1.1.2 Reciclado en caliente.....	6
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.3 OBJETIVOS.....	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4 ALCANCES GLOBALES.....	10
1.5 LIMITACIONES.....	11
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN A DESARROLLAR.....	13
CAPITULO II: MARCO TEORICO CONCEPTUAL	
2.0 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	16
2.1 INTRODUCCIÓN.....	16
2.2 DESARROLLO DE CONCEPTOS BÁSICOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	16
2.2.1 Pavimento.....	16
2.2.2 Tipos de pavimentos.....	17
2.2.2.1 Pavimento rígido.....	17

2.2.2.2 Pavimento flexible.....	18
2.2.3 Otros conceptos de pavimentos flexibles.....	18
2.2.4 Otras definiciones importantes.....	18
2.3 COMPONENTE ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	21
2.3.1 Terreno de fundación.....	22
2.3.2 Terracería.....	22
2.3.3 Subrasante.....	22
2.3.4 Subbase.....	23
2.3.4.1 Principales funciones de la Subbase.....	23
2.3.5 Base.....	24
2.3.5.1 Tipos de Base.....	25
2.3.5.2 Principales funciones de la Base.....	25
2.3.6 Carpeta.....	25
2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	26
2.4.1 Mezcla asfáltica en frío.....	27
2.4.2 Mezcla asfáltica en caliente.....	27
2.4.3 Tratamiento superficial.....	27
2.4.4 Macadán asfáltico.....	29
2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	29
2.5.1 Ventajas.....	29
2.5.2 Desventajas.....	30
2.6 ASPECTOS IMPORTANTES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	30
2.6.1 Vida de un pavimento flexible.....	30
2.6.2 Mecanismos de deformación.....	32
2.6.3 Categorías de mantenimiento.....	33
2.7 CONCEPTOS BÁSICOS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS.....	37
2.7.1 Que es reciclar.....	37
2.7.2 Porqué reciclar.....	37
2.7.3 Que es el reciclaje de pavimentos.....	38

2.7.4 Ventajas del reciclaje de pavimentos.....	39
2.7.5 Técnicas de reciclaje.....	40
2.7.6 Que es mezcla reciclada.....	41

CAPITULO III: DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

3.0 DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	43
3.1 INTRODUCCION.....	43
3.2 FISURAS Y GRIETAS.....	43
3.2.1 Fisura piel de cocodrilo.....	43
3.2.2 Fisuras en bloque.....	46
3.2.3 Fisuras en arco.....	48
3.2.4 Fisura transversal.....	50
3.2.5 Fisura longitudinal.....	51
3.3 DEFORMACIONES SUPERFICIALES.....	57
3.3.1 Ahuellamiento.....	57
3.3.2 Corrimiento.....	59
3.3.3 Corrugación.....	61
3.3.4 Hinchamiento.....	62
3.3.5 Hundimiento.....	63
3.4 DESINTEGRACIÓN DEL PAVIMENTO.....	65
3.4.1 Bache.....	65
3.4.2 Peladura.....	66
3.4.3 Desintegración de bordes.....	68
3.5 OTROS DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS.....	70
3.5.1 Exudación de asfalto.....	70
3.5.2 Parchados y reparaciones de servicios públicos.....	72

CAPITULO IV: CONSIDERACIONES GENERALES, ESPECIFICACIONES

TECNICAS Y MEZCLA RECICLADA

4.0 CONSIDERACIONES GENERALES, ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y MEZCLA RECICLADA.....	75
4.1 INTRODUCCION.....	75
4.2 CONSIDERACIONES AMBIENTALES.....	76
4.2.1 Disposición de material sobrante y desechos (Botaderos).....	76
4.2.2 Sáborelos campamentos.....	77
4.2.3 Sitios de préstamo.....	77
4.2.4 La localización de la planta asfáltica y el transporte de asfalto.....	78
4.3 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO.....	78
4.3.1 Sello de grietas.....	79
4.3.2 Sello de fisuras.....	81
4.3.3 Bacheo superficial.....	83
4.3.4 Bacheo profundo.....	85
4.4 RECICLADO DE PAVIMENTOS.....	89
4.4.1 Evaluación de materiales para la mezcla en frío (Traducción Libre).....	89
4.4.1.1 Muestra de campo.....	90
4.4.1.2 Pavimento asfáltico recuperado. (RAP).....	90
4.4.1.3 Agregado material recuperado. (RAM).....	91
4.4.1.4 Nuevos agregados.....	92
4.4.2 Agentes estabilizadores.....	93
4.4.2.1 Agentes estabilizadores cementantes.....	94
4.4.2.1.1 Estabilización con cemento.....	95
4.4.2.1.1.1 Agrietamiento del material tratado con cemento.....	96
4.4.2.1.1.2 Criterios para las capas estabilizadas con cemento.....	99
4.4.2.2 Agentes estabilizadores bituminosos.....	100

4.4.2.2.1	Estabilización con emulsión asfáltica.....	102
4.4.2.2.1.1	Tipos de emulsiones asfálticas.....	103
4.4.2.2.1.2	El trabajo con emulsiones asfálticas.....	108
4.4.2.2.1.3	El concepto de la cantidad total de fluidos...110	
4.4.2.2.1.4	Criterios para las capas estabilizadas con emulsión asfáltica.....	111
4.4.2.2.2	Estabilización con asfalto espumado.....	113
4.4.2.2.2.1	Características del asfalto espumado.....	114
4.4.2.2.2.2	El trabajo con asfalto espumado.....	118
4.4.2.2.2.3	Criterios para las capas estabilizadas con asfalto espumado.....	122
4.4.2.3	El asfalto.....	123
4.4.2.4	Agua.....	125
4.4.3	Diseño de mezcla de reciclado en frío.....	126
4.4.3.1	Pasos de preparación.....	127
4.4.3.2	Diseño de la mezcla.....	128
4.4.4	Ejemplo de diseño.....	132
4.4.5	Evaluación de materiales para la mezcla en caliente.....	137
4.4.5.1	Alcance.....	137
4.4.5.2	Pruebas.....	137
4.4.5.3	El pavimento asfáltico a reciclar.....	138
4.4.5.4	Asfalto nuevo.....	144
4.4.5.5	Agentes de reciclaje.....	145
4.4.5.6	Agregado sin tratar.....	145
4.4.5.7	Combinación de agregados.....	146
4.4.6	Diseño de mezcla de reciclado en caliente.....	147
4.4.6.1	Alcance.....	147
4.4.6.2	pasos de preparación.....	147
4.4.6.3	diseño de la mezcla.....	148

4.4.6.4 Ejemplo del diseño.....	159
---------------------------------	-----

CAPITULO V: DISEÑO DEL ESPESOR RECICLADO EN FRÍO

5.1 PROPÓSITOS DEL PAVIMENTO.....	167
5.2 CATEGORÍAS DE RECICLAJE EN FRÍO.....	168
5.2.1 Reciclaje profundo.....	169
5.2.2 Reciclaje superficial o de capas delgadas.....	172
5.3 INVESTIGACIÓN DEL PAVIMENTO.....	174
5.3.1 Estudio de la información disponible.....	174
5.3.2 Análisis del tráfico de diseño.....	175
5.3.2.1 El tráfico.....	176
5.3.3 Métodos de investigación.....	181
5.3.3.1 Inspección visual.....	182
5.3.3.2 Penetrómetro dinámico de cono.....	183
5.3.3.3 Apiques.....	185
5.3.3.4 Toma de núcleos.....	186
5.3.3.5 Medidas de la profundidad de ahuellamiento.....	186
5.3.3.6 Medidas de deflexiones.....	187
5.3.3.7 Ensayos de laboratorio.....	187
5.4 ENFOQUES PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	188
5.4.1 Enfoques para diseño según Wirtgen.....	188
5.4.1.1 Generalidades.....	190
5.4.1.1.1 Diseño de mezclas.....	190
5.4.1.1.2 Confiabilidad de los métodos de diseño.....	191
5.4.1.1.2.1 Métodos de diseño basados en el CBR.....	192
5.4.1.1.2.2 Método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono.....	192
5.4.1.1.2.3 Métodos basados en las deflexiones.....	193
5.4.1.1.2.4 Métodos racionales de diseño.....	194

5.4.1.2 Procedimientos para el diseño de pavimentos.....	195
5.4.1.2.1 Pasos para el diseño en el reciclaje profundo.....	196
5.4.1.2.2 Pasos para el diseño de reciclaje superficial o de capas delgadas... ..	216
5.4.2 Enfoque para diseño según el Instituto del Asfalto.....	224
5.4.2.1.1 Tablas.....	227
5.4.2.1.2 Cartas de diseño.....	232
5.5 EJEMPLOS DE DISEÑO.....	236
5.5.1 Ejemplo de diseño según Wirtgen.....	236
5.5.2 Ejemplo de diseño según el Instituto del Asfalto.....	237
5.5.3 Ejemplo de diseño, basado en el método de la AASHTO.....	238

CAPITULO VI: DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO PARA RECICLADO
EN CALIENTE

6.0 DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO PARA RECICLADO EN CALIENTE.....	241
6.1 MÉTODOS DE RECICLADO.....	242
6.2 GUIA AASTHO PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS, 1993.....	244
6.2.1 Introducción.....	244
6.2.2 Antecedentes.....	244
6.2.3 Procedimientos de diseño de pavimentos flexibles.....	248
6.2.3.1 Variables de entrada o diseño.....	248
6.2.3.1.1 Variables de tiempo.....	248
6.2.3.1.2 Subrasante.....	250
6.2.3.1.3 Tránsito.....	257
6.2.3.1.3.1 Conversión de Tránsito de ESAL.	257
6.2.3.1.3.2 Factor Equivalente de Carga.....	257

6.2.3.1.3.3	Factor de Camión.....	258
6.2.3.1.3.4	Factor de Distribución por Dirección (DD).	258
6.2.3.1.3.5	Factor de Distribución por Carril (LD).	259
6.2.3.1.3.6	Procedimiento de Cálculo Riguroso.....	260
6.2.3.1.3.7	Factores que Afectan el Cálculo del ESAL..	262
6.2.3.1.4	Confiabilidad.....	263
6.2.3.1.5	Efectos ambientales.....	264
6.2.3.2	Criterios de adopción de niveles de serviciabilidad.....	271
6.2.3.3	Propiedades de los materiales.....	273
6.2.3.3.1	Caracterización de los materiales de las capas del pavimento.....	273
6.2.3.4	Condiciones de drenaje.....	280
6.2.3.5	Cálculo de los espesores de las capas del pavimento.....	282
6.2.3.5.1	Determinación del número estructural requerido.....	283
6.2.3.5.2	Prueba de alternativas de espesores de capas del pavimento.....	284
6.2.3.5.3	Concepto de análisis de capas.....	285
6.2.3.6	Estabilidad y facilidad de construcción.....	290
6.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS		
UTILIZADO POR EL INSTITUTO AMERICANO DEL ASFALTO (MS-1)....		
6.3.1	Introducción.....	291
6.3.1.1	Alcance.....	291
6.3.1.2	Base del diseño.....	291
6.3.1.3	Bases asfálticas.....	293
6.3.1.4	Pavimento todo-concreto asfáltico.....	293
6.3.2	Consideraciones del diseño.....	296
6.3.2.1	Introducción.....	296
6.3.2.2	Clasificación de carreteras y calles.....	296
6.3.2.3	Selección de variables de diseño.....	297

6.3.2.4	Construcción por etapas.....	298
6.3.2.5	Comparaciones económicas.....	299
6.3.3	Principios de diseño.....	300
6.3.3.1	Base de diseño.....	300
6.3.3.2	Criterios de diseño.....	301
6.3.3.2.1	Caracterización de materiales.....	302
6.3.3.2.1.1	Concreto asfáltico.....	302
6.3.3.2.1.2	Materiales granulares.....	303
6.3.3.2.1.3	Consideraciones ambientales.....	303
6.3.3.3	Gráficas de diseño.....	303
6.3.4	Análisis de tráfico.....	304
6.3.4.1	Introducción.....	304
6.3.4.2	Estimación del volumen de tráfico.....	305
6.3.4.2.1	Método de análisis.....	305
6.3.4.2.2	Clasificación y número de vehículos.....	306
6.3.4.2.3	Carril de diseño.....	308
6.3.4.2.4	Período de diseño.....	308
6.3.4.2.5	Capacidad de la carretera.....	309
6.3.4.2.6	Tasa de crecimiento del tráfico.....	309
6.3.4.3	Estimación del ESAL.....	312
6.3.4.4	Determinación del ESAL de diseño.....	314
6.3.4.5	Calles residenciales, zonas de parqueo y hombros.....	320
6.3.4.5.1	Calles residenciales y zonas de parqueo.....	320
6.3.4.5.2	Hombros.....	321
6.3.5	Evaluación de materiales.....	322
6.3.5.1	General.....	322
6.3.5.2	Subrasante.....	323
6.3.5.2.1	Definición.....	323
6.3.5.2.2	Subrasante mejorada.....	323

6.3.5.2.3	Métodos de evaluación.....	324
6.3.5.2.4	Muestreo y ensayos.....	325
6.3.5.2.5	Selección del modulo de resiliencia de diseño de la subrasante.....	327
6.3.5.2.5.1	Ejemplo.....	329
6.3.5.2.6	Requerimientos de compactación de la subrasante.....	331
6.3.5.3	Concreto asfáltico para superficie y base.....	332
6.3.5.3.1	Requerimientos de materiales para concreto asfáltico.....	332
6.3.5.3.2	Criterios de compactación del concreto asfáltico.....	333
6.3.5.3.3	Mezclas de emulsiones asfálticas para bases.....	334
6.3.5.3.3.1	Requisitos de Materiales para Mezclas de Emulsiones Asfálticas.	334
6.3.5.3.3.2	Requisitos de Compactación para Mezclas de Emulsiones Asfálticas.....	335
6.3.5.4	Bases y subbases granulares.....	337
6.3.5.4.1	Requerimientos para materiales granulares de base y subbase.....	337
6.3.5.4.2	Requerimientos de compactación para bases y subbases granulares.	337
6.3.6	Procedimiento de diseño estructural.....	338
6.3.6.1	Datos de entrada para el diseño: tráfico, subrasante y materiales.....	339
6.3.6.2	Factores ambientales.....	341
6.3.6.3	Espesores mínimos de concreto asfáltico.....	342
6.3.6.3.1	Determinación de espesores de pavimentos: todo concreto asfáltico (full-depth).....	343
6.3.6.3.1.1	Ejemplo:.....	344
6.3.6.3.2	Determinación de espesores de pavimentos con base granular.....	344

6.3.6.3.2.1 Ejemplo.....	345
6.3.6.3.3 Determinación del espesor para pavimento con mezclas de asfalto emulsificado sobre base de agregados no tratados....	346
6.3.6.3.3.1 Ejemplo.....	348
6.3.6.4 Construcción en etapas.....	349
6.3.6.4.1 Ventajas de la construcción en etapas.....	350
6.3.6.4.2 Método de diseño.....	351
6.3.6.4.2.1 Ejemplo.....	351
6.3.6.4.2.2 Ejemplo.....	352

CAPITULO VII: PROCESO CONSTRUCTIVO

7.0 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	356
7.1 INTRODUCCIÓN.....	356
7.2 GENERALIDADES.....	356
7.3 RECICLAJE EN FRIÓ.....	358
7.3.1 Planeación para el reciclaje.....	358
7.3.1.1 Tipo de máquina recicladora.....	359
7.3.1.1.1 Recicladoras.....	359
7.3.1.1.2 Compactadores.....	365
7.3.1.1.3 Niveladoras.....	368
7.3.1.1.4 Distribuidores de conglomerantes.....	369
7.3.1.2 Geometría de la vía.....	373
7.3.1.3 Objetivo de producción.....	374
7.3.1.4 Requisitos del producto terminado.....	374
7.3.1.5 Material en el pavimento existente.....	374
7.3.1.6 Comportamiento del material reciclado.....	375
7.3.1.7 Requisitos de pre-reciclado.....	375
7.3.2 Logística.....	375
7.3.2.1 Material importado.....	376

7.3.2.2 Agentes estabilizadores.....	377
7.3.2.3 El agua.....	377
7.3.2.4 Resultados de laboratorio y especificaciones técnicas.....	379
7.3.3 Trabajos preliminares al reciclaje.....	381
7.3.3.1 Acomodación del tráfico público.....	381
7.3.3.2 Preparación de la superficie.....	383
7.3.3.2.1 Limpieza.....	384
7.3.3.2.2 Perdidas de agregados en el pavimento existente.....	385
7.3.3.2.3 Remoción de obstáculos.....	386
7.3.3.3 Conformación de la vía existente antes del reciclaje.....	387
7.3.3.3.1 Fresado preliminar al reciclaje.....	388
7.3.3.3.2 Importación de material nuevo.....	390
7.3.3.3.3 Preparación del tren de reciclaje.....	391
7.3.4 Operación de reciclaje.....	393
7.3.4.1 Extensión del agente estabilizador.....	393
7.3.4.2 Avance del tren de reciclaje.....	397
7.3.4.3 escarificado y mezclado.....	402
7.3.4.4 Compactación.....	405
7.3.4.5 Terminado de la superficie.....	409
7.3.4.6 Juntas y traslapos.....	410
7.3.4.6.1 Juntas longitudinales.....	410
7.3.4.6.2 Juntas transversales.....	413
7.3.4.7 Carpeteo.....	414
7.4 RECICLADO EN CALIENTE-	417
7.4.1 Introducción.....	417
7.4.2 Métodos de reciclaje en caliente.....	420
7.4.2.1 Método de reciclaje en caliente Re - formado.....	420
7.4.2.2 Repavimentado.....	421
7.4.2.3 Re - mezclado.....	422

7.4.2.4 Re - mezclado plus.....	423
7.4.3 Proceso constructivo del reciclaje en caliente de pavimentos flexibles...	425
7.4.3.1 Resumen.....	425
7.4.3.2 Operación del equipo y de los consumibles.....	426
7.4.3.3 Procedimientos en el sitio.....	428
7.4.3.4 Abastecimiento de aditivos.....	429
7.4.3.5 Control del tráfico.....	432
7.4.3.6 Comienzo de operaciones con el tren de reciclaje.....	433
7.4.3.7 Pasos operacionales.....	436
7.4.3.8 Calentamiento de la superficie.....	436
7.4.3.9 Escarificación.....	440
7.4.3.10 Adición del bituminoso.....	441
7.4.3.11 Reclamo del material escaificado.....	443
7.4.3.12 Mezclado.....	443
7.4.3.13 Adición de la nueva mezcla.....	444
7.4.3.14 Calentamiento de la superficie escaificada.....	445
7.4.3.15 Colocación de la mezcla con la plancha vibratoria.....	446
7.4.3.16 Compactación de rodillo.....	448
7.4.3.17 Procedimiento de rodillo.....	449
7.4.3.18 Reabriendo el camino al tráfico.....	450

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES.....	453
8.2 RECOMENDACIONES.....	458
8.3 BIBLIOGRAFIA.....	460
ANEXOS.....	463

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGIA UTILIZADA

ABREVIATURAS

AASHTO: Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y transporte

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas de Material

CBR: California Bearing Radio o Valor Relativo de Soporte

CIR: Cold In-place Recycling (Reciclado In-situ en Frío)

DCP: El Penetrómetro Dinámico de Cono.

E.E.: Cargas Equivalentes a un Eje Estándar

EAL : Carga Legal por Ejes

FOVIAL: Fondo de Conservación Vial

FP 96 o FP 03: Especificaciones Normales para la Construcción de Caminos y Puentes en Proyectos de Carreteras Federales.

IP: Índice de Plasticidad

ITS: Resistencia a la Tensión Indirecta

MOP: Ministerio de Obras Públicas

OTFC: Optimum Total Fluid Content

RAM: Agregado Material Recuperado (base granular existente)

RAP: Pavimento Asfáltico Recuperado (carpeta asfáltica existente)

RRD: Deflexión Elástica Representativa

SIECA: Secretaría de Integración Económica Centroamericana

TPDA: Tránsito Promedio Diario Anual

UCS: Resistencia a la Compresión Inconfinada

SN: Número estructural

ESAL's: Número de repeticiones de carga equivalente de un eje simple de ruedas duales de carga estándar de 18,000 Lb (80 KN)

SIMBOLOGIA

Δ : Diferencia

a: Porcentaje de agregado material retenido en la malla 2.36 mm (No 8)

ACmin = Espesor mínimo de concreto asfáltico

a_i : Coeficiente de la capa i (1/pulg)

b: Porcentaje de agregado material que pasa la malla 2.36 mm (No 8) y retenido en la malla 75 μ m (No 200)

c: Porcentaje de agregado material que pasa la malla 75 μ m (No 200)

DD: Factor de distribución por dirección

D_i : Espesor de la capa i pulg.

DL: Factor de distribución por carril.

El desarrollo de la ecuación anterior permite definir la curva de la Figura 6.4 que es la manera correcta de proceder.

F: 0 a 2.0 por ciento. Basado en la absorción del agregado. La fórmula basada en un promedio de gravedad específica de 2.6 a 2.7. En la ausencia de otros datos de un valor de 0.7 a 1.0 debe cubrir la mayoría de las condiciones.

Fy: factor de crecimiento del tráfico

H: porcentaje de tráfico pesado

IRI: Índice de Rugosidad Internacional

K: 0.15 para 11-15 porcentaje que pasa la malla 75 μ m (No 200), 0.18 para 6-10 porcentaje que pasa la malla 75 μ m (No 200), 0.20 para el 5 por ciento o menos que pasa la malla 75 μ m (No 200)

LEF: El factor equivalente de carga

m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i.

Mr: Modulo de Resiliencia

P_c: Porcentaje de material asfáltico por peso de la mezcla total.

P_o: índice de serviciabilidad inicial

P_r: Porcentaje de asfalto nuevo en la mezcla reciclada

P_s: Probabilidad de expansión, % del área total sujeto a expansión. La probabilidad de expansión es considerada en 100% si el Índice de Plasticidad del suelo es mayor del 30% y el espesor de la capa es mayor de 60 cm. o sí V_R es mayor de 0.2 pulg.

P_t: El índice de serviciabilidad final

R: 1.0 para cemento asfáltico; 0.60 a 0.65 para emulsiones asfálticas.

t : Tiempo en años. Corresponde al período de diseño adoptado.

T_A - 2 = Espesor de la base usando el diseño de todo concreto asfáltico

T_E - 2 = Espesor de la base usando el diseño de base de asfalto emulsificado

T_{EB} = Espesor de la base de asfalto emulsificado.

T_u = Espesor de concreto asfáltico usando el diseño de base de agregado no tratado.

U_f : valor de daño relativo

V_R : Potencial de levantamiento vertical (pulg.), representa el levantamiento que puede ocurrir ante condiciones extremas de expansión (alta plasticidad y porosidad). Variable entre 0 y 4 pulgadas. Se obtiene de ensayos en laboratorio (ASTM D424).

ΔPS_{Isw} : Pérdida de serviciabilidad debido a la expansión de suelos de subrasante.

θ : Tasa constante de expansión, variable entre 0.40 y 0.20. Los valores mayores corresponden a que el suelo de subrasante es expuesto a una gran humedad debido a las precipitaciones, pobres condiciones de drenaje u otras. Valores menores se adoptan cuando el suelo es menos accesible por el agua, dificultad de ingreso y suelos sin grietas.

INTRODUCCIÓN

La vida de las vías de comunicación de transporte terrestre, parece estar sometida a un ciclo repetitivo de construcción. Esto se debe a la conservación insuficiente que durante muchos años sufrieron dichas vías, dando lugar así a la degradación de las mismas. Bajo la necesidad de volver a proveer una nueva condición adecuada para el tráfico y con la limitante de la carencia relativa de agregados (con sus altos costos); es necesario volver la vista hacia la recuperación de caminos a través de los métodos que nos beneficien en carreteras durables.

Por esta razón se ha investigado sobre técnicas de mantenimiento de vías, que reduzca los costos de una reconstrucción, de mano de obra y equipo a usar, lo que ha traído consigo alternativas como la de extraer los materiales que conforman al pavimento y reutilizarlos, mezclándolos con otros productos dando origen así a lo que es el reciclaje.

El reciclaje de pavimento asfáltico es una tecnología especial que permite la reconstrucción de los pavimentos envejecidos y/o deteriorados, empleando sus materiales de construcción originales. Esto es posible en la medida en que no haya llegado a un grado de degradación tal que no permita un rejuvenecimiento eficiente.

La técnica del reciclaje tiene un conjunto de ventajas, entre las que predomina la disponibilidad in situ de casi la totalidad de los áridos de la calidad y granulometrías adecuadas; un requerimiento mínimo o nulo del material nuevo, y la posibilidad de mantener las cotas de la altura originales de las carreteras, lo que es de muy especial

interés en las zonas urbanas y en los lindes con puentes, cruces y otras estructuras viales preexistentes.

El reciclaje en nuestro país ya comenzó a utilizarse en carreteras por parte del Ministerio de Obras Publicas (MOP), quien promueve proyectos de rehabilitación como lo es actualmente FOVIAL (Fondo de conservación VIAL), en donde se está utilizando esta técnica.

El reciclaje se divide principalmente en dos métodos los cuales son reciclaje en frío y reciclaje en caliente, ambos se están usando en el país y de los cuales se mostraran sus procesos constructivos, sus ventajas y desventajas, sus diferencias y además la maquinaria que se emplea para rehabilitar un pavimento por este método.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.0 GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Durante los últimos cincuenta años se ha presentado un desarrollo sin precedentes en infraestructura, particularmente en la de carreteras. Muchos miles de kilómetros de nuevas carreteras fueron construidas alrededor del mundo para satisfacer la demanda de los volúmenes crecientes de tráfico. Gran parte de estas carreteras han estado en uso por más de dos décadas y han alcanzado el final de su periodo de diseño, adicionando a ello que la masa promedio de los vehículos ha aumentado, las mayores cargas por eje y la edad, han contribuido en forma continua a través de los años, al deterioro de las carreteras, requiriendo por tanto, el desarrollo de nuevas técnicas que permitan conservarlas en niveles de servicios aceptables, lo que dio origen a la técnica del reciclaje de pavimentos asfálticos.

Un primer precedente del empleo de las técnicas del reciclado se dio después de la Segunda Guerra Mundial, cuando para reparar las carreteras secundarias afectadas por la misma se puso en práctica en el Reino Unido un procedimiento llamado “Retread Process” o proceso de recauchutado.

Consistía en escarificar el firme, añadir en caso necesario una pequeña cantidad de árido y mezclar in situ el material escarificado con el aportado con ayuda de una motoniveladora o una grada de discos. A continuación se regaba con una emulsión bituminosa de bajo contenido de ligante, e inmediatamente se procedía al mezclarlo con gradas de discos. El primer día sólo se compactaba muy ligeramente el material

mezclado, puesto que tenía mucha agua, y al día siguiente se terminaba la compactación. Se trataba de un procedimiento muy simple pero que, ejecutado correctamente, proporcionaba unos resultados aceptables.

Posteriormente la técnica siguió utilizándose de forma no muy generalizada, puesto que los equipos de los que se disponía no podían garantizar una mezcla adecuada ni tampoco una compactación eficaz en espesores superiores a 15 cm, cifra que hoy en día se considera como el límite inferior para poder obtener una capa reciclada con una correcta capacidad de soporte.

En El Salvador saneamiento y pavimentación de la red vial, dio inicio en 1912, pero fue hasta finales de 1916 que se construyó la primera carretera y fue la que de San Salvador conduce al puerto de La Libertad y posteriormente se construye la carretera Panamericana, y es así como se fue conformando la red vial de nuestro país.

Pasado los años la red vial se encontraba seriamente afectada por un mantenimiento deficiente, un incremento vehicular, malos drenajes, la edad, etc. con la urgencia de habilitar nuevamente las carreteras.

Anteriormente las superficies y bases que conforman un pavimento eran comúnmente removidas cuando este ya estaba muy deteriorado o ya había cumplido con su vida útil, el fin que se le daba a estos materiales era un desalojo total, y eran restituidos por materiales nuevos, elevándose así los costos por la construcción de una carretera nueva.

En general la red vial de El Salvador ya cumplió con su vida útil, y en algunas vías ésta ha sido reducida por haber sido sometida a un flujo vehicular mayor al del diseño o por

defectos de procedimiento, supervisión o calidad de los materiales utilizados en la construcción, por lo que es necesaria una rehabilitación inmediata.

Ahora ante tal situación se está utilizando un método de rehabilitación de carreteras como lo es el reciclaje, lo cual genera una forma de ahorrar energía, recursos naturales, fondos y reducir el problema de la disposición de desechos, tal actividad esta siendo desarrollada a través del Ministerio de Obras Publicas (MOP) con la aplicación del programa Fondo de conservación Vial (FOVIAL).

Algunos tipos de reciclado de pavimentos flexibles conocidos y utilizados actualmente, son los mencionados a continuación:

- ✓ Reciclado en frío
- ✓ Reciclado en caliente

1.1.1 Reciclado en frío

En este se renueva el pavimento asfáltico hasta una profundidad especificada y la superficie es restaurada, con las pendientes longitudinal y transversal deseadas, y libre de materiales ajenos a la estructura del pavimento existente, huellas y otras imperfecciones o daños superficiales que involucren pérdida de material. La remoción del pavimento o fresado se completa con la máquina de tambor giratorio autopropulsado para cepillado en frío. El pavimento asfáltico recuperado (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) es escarificado, estabilizado, mezclado y compactado.

Si bien el reciclado en frío se realiza también empleando la planta central o fija, el método mas comúnmente utilizado es el reciclado frío in-situ (Cold in-place recycling,

CIR). En el CIR, habitualmente el pavimento asfáltico existente es procesado hasta una profundidad de 10 mm o más, dependiendo de los requerimientos estructurales de diseño. El pavimento es pulverizado y el material recuperado se mezcla con la emulsión asfáltica u otro agente estabilizador como el cemento; luego se extiende y se le compacta, construyéndose así una base. Las bases recicladas en frío requieren una nueva superficie asfáltica. Para pavimentos de bajo tráfico, puede aplicarse un tratamiento de superficie con una emulsión. Para tráfico intenso, puede aplicarse un tratamiento de superficie con emulsión modificada o una carpeta de rodamiento con una mezcla asfáltica en caliente.

En algunos procesos de reciclaje de pavimentos son utilizados tipos de agentes estabilizadores los cuales sirven para superar las limitaciones inherentes a los materiales naturales sobre el comportamiento del pavimento; a parte de incrementar las características de resistencia de un material, estos agentes aumentan su durabilidad y su resistencia frente a la acción del agua.

La falta de materiales de buena calidad para la construcción de carreteras y que los costos de transporte para importar materiales adecuados son bastante elevados, se ha promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder usar las fuentes disponibles. A menudo la resistencia requerida puede obtenerse con materiales marginales locales mediante la adición de pequeñas cantidades de un agente estabilizador, a un precio relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclaje como a las nuevas construcciones. Al adicionar un agente estabilizador puede

mejorarse el material recuperado del pavimento, evitándose de esta manera importar nuevos materiales para alcanzar la resistencia necesaria en la estructura del pavimento rehabilitado.

Una de las razones que más ha favorecido el empleo crecientes de la técnica de estabilización de explanadas y de reciclado in-situ de pavimentos existentes ha sido el espectacular avance experimentado por los equipos específicos para esta tipo de obras: los distribuidores de conglomerantes, las estabilizadoras y las recicladoras.

En lo que se refiere a los equipos y distribuidores de conglomerantes y los mecanismos de dosificación, hay que señalar la aparición de equipos que mezclan los materiales que se incorporan directamente al interior de la maquina estabilizadora o recicladora.

En cuanto a las estabilizadoras y recicladoras, los equipos mas usuales son los que pueden utilizarse para ambos tipos de obras, estabilizaciones y reciclados, sin mas que cambiarles el rotor en los que van alojados los elementos de disgregación (picas o paletas) o bien, en algunos casos, empleando un único rotor. Para los reciclados existen otras posibilidades, como son los equipos que pueden ser empleados igualmente para el fresado de pavimentos existentes.

1.1.2 Reciclado en caliente.

Se combina el RAP (pavimento asfáltico recuperado) con agregado nuevo y cemento asfáltico y/o agente de reciclado, para producir una mezcla asfáltica en caliente. Si bien se usan plantas en caliente por pastones (terceados), comúnmente las plantas empleadas para producir la mezcla reciclada son las del tambor. El RAP en su mayor parte es

producido por fresado en frío pero también puede elaborarse a partir de la remoción del pavimento y trituración. Los equipos y procedimientos para colocación y compactación de la mezcla son aquellos típicos de las mezclas asfálticas en caliente.

Reciclado en caliente in-situ.

El reciclado se lleva a cabo en el lugar y el pavimento típicamente se procesa hasta una profundidad de 20-60 mm. El pavimento asfáltico es calentado, ablandado y escarificado hasta la profundidad especificada. Se agrega una emulsión asfáltica u otro agente de reciclado, y empleando uno de los procesos, se incorpora nueva mezcla asfáltica en caliente en la medida necesaria.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En El Salvador la mayoría de carreteras existentes ya cumplieron su período de vida o se han deteriorado, debido a factores como la colocación de materiales de mala calidad, malos drenajes o insuficientes y los datos de tráfico erróneos lo cual ocasiona gastos elevados en reparaciones de estas a corto plazo. En busca de darle solución a problemas como estos se hace necesario evaluar las distintas alternativas de rehabilitación y así poder tener una reducción de los costos de construcción para volver funcional una carretera específica.

En nuestro país ya existe la técnica de reciclaje de pavimentos flexibles y esta siendo utilizado por el Ministerio de Obras Públicas, que han recopilado información de este proceso de otros países donde se usan estos métodos de rehabilitación de pavimentos desde hace varios años.

La expansión, rehabilitación y mantenimiento de cualquier sistema vial depende de recursos fiscales para financiar el sistema; la tecnología para planear, diseñar, construir y mantener el mecanismo en una manera económica; suministro de agregados y aglomerantes; equipo y recursos humanos que utilizamos para construir y mantener las redes viales.

Las entidades responsables del mantenimiento de vías terrestres como lo es el MOP se enfrentan a un número de problemas que incluye:

1- Una reducción de los fondos para el mantenimiento de vías causada por la inflación en nuestro país.

2- Problemas de suministro de materiales ocasionados por la falta de fuentes de abastecimiento cercanas al lugar de uso, inaccesibilidad causada por leyes zonificadoras, mayores distancias de acarreo y costos de transportación consecuente, códigos ambientales que limitan la explotación de agregados en ciertas áreas como ríos y minas que requieren restauración, además de que estos agregados también se utilizan para otras ramas de la construcción.

Problemas como la falta de recursos están siendo tratados actualmente con la aplicación del FOVIAL, cuya función principal es la recaudación de fondos a través de el aumento de un porcentaje al costo de la gasolina para quienes hacen uso de la red vial, los cuales están siendo destinados al mantenimiento de las carreteras y aunque esta medida trae consigo grandes beneficios, como la rehabilitación de estas vías, resulta de mucho interés darle un enfoque no solo a nivel financiero a esta situación, sino también a nivel de recursos naturales y de cómo conservarlos; de ahí nace la importancia de la técnica

del reciclaje que no es suficiente ejecutarla, sino también conocerla, y como sacar los mayores provechos de ella, conociendo aspectos como:

- ✓ Factibilidad del reciclado
- ✓ La definición del tipo de reciclados
- ✓ Características de los materiales a reciclar y los que serán incorporadas como nuevos.

A pesar de que esta técnica a traído consigo grandes resultados habemos muchos que desconocemos los aspectos mas importantes de ella y los conocimientos y documentaciones pertenecen a en entidades extranjeras o monopolios que difícilmente ponen al alcance de cualquiera que quiera conocer mas acerca del reciclaje de pavimentos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general.

La elaboración de un documento en el cuál se den a conocer todos aquellos aspectos más importantes de la técnica de reciclado de pavimentos flexibles sea este en frío o en caliente.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Conocer los estudios previos que se le realizan a un pavimento asfáltico antes de ser sometido a un proceso de reciclaje.
- Dar a conocer los diferentes tipos de reciclados de pavimento asfáltico sea este en frío o en caliente.

- Conocer los lineamientos o especificaciones técnicas que aplican al proceso constructivo del reciclado.
- Conocer las características y propiedades generales de los materiales nuevos y existentes de un pavimento que será sujeto de un proceso de reciclado.
- Dar una descripción de cuales son y como funcionan los equipos mas utilizados en nuestro país, para el uso de la técnica de reciclado.
- Conocer el proceso constructivo de la técnica del reciclaje

1.4 ALCANCES GLOBALES

Se recopilará información bibliográfica referente a la rehabilitación de pavimentos asfálticos por la técnica del reciclaje en frío y en caliente, además maquinaria comúnmente utilizada en dicho proceso. Así mismo se seguirán de cerca proyectos que se estén ejecutando o ya hayan sido ejecutados para sacar de ellos la información necesaria, como los estudios previos, resultados de ensayos y/o especificaciones que puedan enriquecer el contenido del desarrollo de este documento.

Los aspectos que se pretenden estudiar, están enfocados a como obtener los resultados mas óptimos de una carretera reciclada, dando a conocer los aspectos que se deben tener en cuenta en los estudios previos, el diseño, y la ejecución de un proyecto, teniendo como base las especificaciones técnicas, como las de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) y las especificaciones Normales para la Construcción de Caminos y Puentes en Proyectos de Carreteras Federales de 1996

(FP'96, siglas en ingles), para llevar a cabo la rehabilitación de un pavimento asfáltico utilizando la técnica del reciclaje in situ.

1.5 LIMITACIONES

Las limitantes que puedan presentarse en el trabajo de investigación se presentan a continuación:

- En el país puede ser que no se están utilizando todos los tipos que existen de reciclaje sean estos en frío o en caliente, por lo que nos limitaremos a plantear los estudios y resultados de los tipos que se estén ejecutando, o se hayan ejecutado, así como también la de aquellos que se logre recopilar la suficiente información, para que pueda ser desarrollada en el documento y pueda así servir como una herramienta que conlleve a conseguir los objetivos anteriormente planteados, en caso contrario podría solamente ser mencionado no profundizándose en ello como en los antes mencionados .
- El documento no incluirá el desarrollo de ensayos de laboratorio realizados a los suelos, agregados, asfaltos ni a la mezcla asfáltica, en una carretera o algún tramo de esta, pero si se presentan que pruebas son las que se deben realizar a cada uno de ellos para rehabilitar una carretera por medio de la técnica del reciclaje, en una forma teórica, ya que dicha información se obtendrá de los siguientes medios; proyectos ya ejecutados o en proceso de ejecución, fuentes bibliograficas de

cualquier índole, charlas referentes al tema y de entrevistas con personas conocedoras sobre la aplicación de dicha técnica.

- A pesar de la importancia la información del tráfico, no se presentan desarrollos de la obtención de tráfico de diseño ni ESA'L, ya que el documento no va enfocado hacia ese fin, y de la que se dispone de otras fuentes de información, por lo que tales valores asumidos para el desarrollo de la técnica.
- En este documento únicamente llevará la información para llevar a cabo el proceso de reciclaje en frío y en caliente in situ, no así los estudios de comparación o confrontación con otros métodos de rehabilitación como lo son el recarpeteo, bacheo, etc. Para determinar que cualquiera de estos métodos era el adecuado en una rehabilitación de un pavimento asfáltico.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Debido a problemas como la poca disponibilidad de materiales cerca del lugar de construcción, y la disposición de desechos, existe una necesidad de optimizar el uso de los agregados, aglomerantes, equipo, mano de obra y recursos.

Una solución a alguno de los problemas de transportación referidos anteriormente es la reutilización o reciclaje de materiales existentes para la construcción, reparación y mantenimiento de carreteras.

Para la rehabilitación de un pavimento asfáltico por el método del reciclaje, los materiales deben estudiarse previamente para determinar si pueden ser recuperados y así ser procesados para producir nuevas mezclas asfálticas la cual deberá cumplir con determinadas especificaciones de tal forma que su utilización no sea causa de daños prematuros en la carretera.

La técnica del reciclaje esta cobrando auge en nuestro país y no siempre se cuenta con material bibliográfico que brinde información teórica completa, que pueda ser aplicada a estudios previos, al diseño y ejecución de proyectos viales a ejecutarse.

De aquí sale la necesidad de contar con un documento que recolecte la información de los tipos más conocidos del reciclaje dando así a conocer esta técnica, contribuyendo también al desarrollo técnico de la ingeniería en esta área de nuestro país.

1.7 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN A DESARROLLAR

Para el desarrollo del trabajo de graduación, la metodología a utilizar será dividida en las siguientes tres etapas:

Etapas I: RECOLECCION DE INFORMACIÓN TEORICA

La información será recopilada a través de visitas a instituciones y personas que se desempeñen en el área de carreteras, y que tengan la posibilidad de brindar toda la información posible para el desarrollo del trabajo de graduación.

También se visitaran bibliotecas que tengan fuentes de información referente al tema del reciclado y de los tipos de este; como lo son el reciclado en caliente y reciclado en frío.

Así como también toda clase de información referente a estudios previos y maquinaria utilizada en la rehabilitación de un pavimento.

Etapa II: **VISITAS**

Se realizaran visitas a diferentes carreteras de nuestro país, para observar, evaluar y poder recopilar informaciones fotográficas acerca del estado en que se encontró la vía y sobre la ejecución de rehabilitación, pruebas a realizar antes y después de la rehabilitación del pavimento y la maquinaria que se este utilizando.

Se buscara apoyo con instituciones encargadas del desarrollo vial de nuestro país como el Ministerio de Obras Públicas (MOP), para solicitar su valiosa ayuda con material bibliográfico u otro tipo de información de experiencias ya vividas en el área de reciclaje de pavimentos.

Etapa III: **ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y CLASIFICACION DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA**

Una vez recopilada la información, se procederá a su respectivo análisis y comparación, para ir seleccionando la concerniente a cada parte del desarrollo de este documento.

Esta etapa se realizara de la mano de los asesores directores, es decir una vez analizada, comparada y clasificada la información, se estará en la obligación de entregar el material para que este sea sometido a discusión, observaciones y correcciones, con el fin de obtener un documento lo más completo posible al final de cada evaluación.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

CONCEPTUAL

2.0 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrollaran los conceptos básicos que deben conocerse acerca de los pavimentos flexibles, se conocerá su concepto, sus componentes estructurales, así como también su clasificación, sus ventajas y desventajas.

También se trataran algunos temas adicionales como los mecanismos de deformación que existen en esta clase de pavimentos, las diferentes fases que puede presentar un pavimento flexible y cuales son las diferentes clases de mantenimiento que se desarrollan a nivel mundial para poder conservar lo mas posible las vías terrestres.

2.2 DESARROLLO DE CONCEPTOS BÁSICOS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

2.2.1 Pavimento.

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas.

Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos.

La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

2.2.2 Tipos de pavimentos.

Básicamente existen dos tipos de pavimentos: - Rígidos

- Flexibles.

2.2.2.1 Pavimento rígido.

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varia entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

2.2.2.2 Pavimento flexible.

El pavimento flexible resulta más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base.

2.2.3 Otros conceptos de pavimentos flexibles.

1. Es la estructura generalmente integrada por la sub-base, base y carpeta de rodadura, construyéndose sobre una terracería debidamente compactada, para poder soportar cargas de tránsito de acuerdo al diseño, impidiendo la acumulación o penetración de humedad, disponiendo de una superficie tersa, resistente al deslizamiento y al deterioro en general¹.
2. Los pavimentos flexibles son aquellos que tienen una base flexible o semirrígida, sobre la cual se ha construido una capa de rodamiento formada por una mezcla bituminosa de asfalto o alquitrán de consistencia plástica².

2.2.4 Otras definiciones importantes.

- ✓ **Agregado:** Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.

¹ Tesis Estudio de los métodos de rehabilitación de pavimentos flexibles en el área metropolitana de San Salvador. Autor: Rogelio Antonio Aguirre Juárez y compañeros.

² Tesis de la universidad de El Salvador, Restauración de pavimentos flexibles con lechadas de cemento Portland, autor: Alex Odir Canales Molina y compañeros.

- **Agregado grueso:** Material retenido por el tamiz de 2.36 mm (No. 8)
- **Agregado fino:** Material que pasa el tamiz de 2.36mm (No. 8)
- **Relleno mineral:** Fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60mm (No. 30)
- **Polvo mineral:** Fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075 mm (No. 200.)
- **Alcantarilla:** Cualquier estructura por debajo de la subrasante de una carretera u otras obras viales, con el objeto de evacuar las aguas superficiales y profundas.
- **Balasto:** Una capa superficial de material selecto consistiendo por lo general de material granular natural o agregado triturado, que se coloca sobre la subrasante terminada de una carretera, con el objeto de protegerla y que sirva de superficie de rodadura, para permitir el libre tránsito durante todas las épocas del año.
- **Daños:** Desperfectos ocurridos en la superficie de una carretera debido a efectos de clima y tránsito tal como se describe en el Catálogo Centroamericano de Daños de Pavimentos Viales.
- **Deflexión:** El desplazamiento vertical temporal de un pavimento proveniente de la aplicación de cargas de las ruedas de los vehículos.
- **Derecho de Vía:** El área de terreno que el Gobierno suministra para ser usada en la construcción de la carretera, sus estructuras, anexos y futuras ampliaciones.
- **Hombro:** Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.

- **Intervención:** La designación aplicada de actividades de mantenimiento rutinario y de obras de mantenimiento periódico consideradas en forma conjunta.
- **Mantenimiento:** Conjunto de tareas de limpieza, reemplazo y reparación que se realizan de manera regular y ordenada en una carretera, para asegurar su buen funcionamiento y la prolongación de su vida de servicio, al máximo compatible con las previsiones de diseño y construcción de la obra. (Fuente: Convenio Centroamericano para la Rehabilitación, Modernización y Mantenimiento de la Red Vial Centroamericana, noviembre de 1997.)
- **Mejoramiento:** Ejecución de las actividades constructivas necesarias para dotar a una carretera existente, en bueno, regular o mal estado, de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor servicio al usuario.
- **Rehabilitación:** Ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente.
- **Rugosidad:** La desviación vertical del perfil de un pavimento de su forma tal como fue diseñado y que resulta en incomodidades en el manejo del vehículo. Por lo general, la rugosidad se mide para fines de mantenimiento vial por medio de IRI.
- **El envejecimiento del asfalto:** es un proceso complejo, consiste principalmente en la evaporación de ciertos componentes y la oxidación por oxígeno de aire. La modificación química se traduce en una alteración de su estructura, aumentando su

dureza, rigidez y fragilidad; como consecuencia pierde la capacidad de ser un ligante adecuado para el concreto asfáltico.

2.3 COMPONENTE ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.

Se refiere a las características relativas de cada una de las capas que constituyen la estructura de la vía tales como: espesor, resistencia y deformabilidad en las condiciones esperadas de servicio. Estas características se pueden agrupar de la siguiente manera:

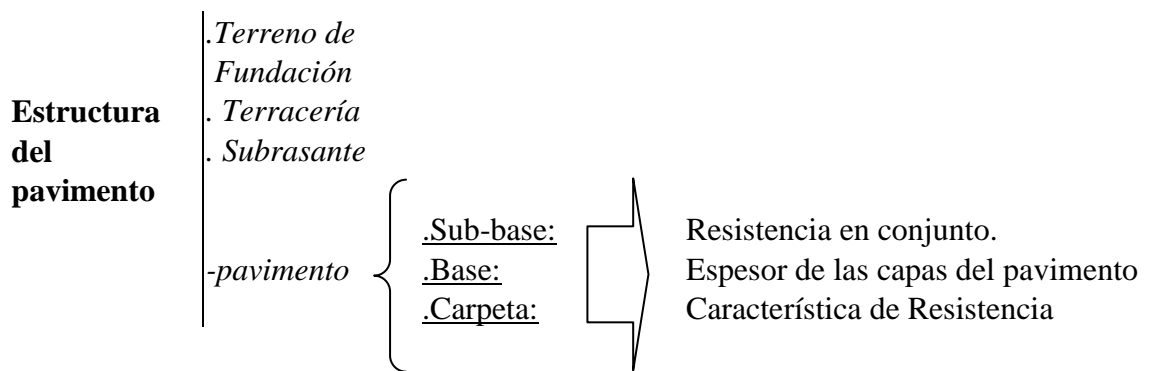
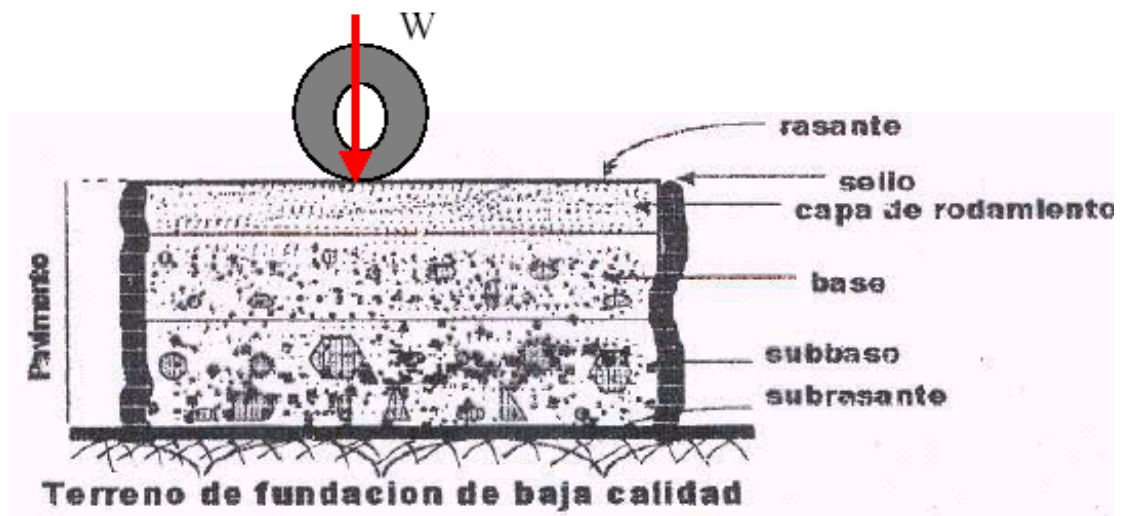


Fig. 1.1 Estructura de un pavimento flexible



2.3.1 Terreno de fundación.

Aunque no constituye parte del pavimento, es muy importante tener un conocimiento lo mas completo posible de los suelos que constituyen el terreno de cimentación de la estructura de la vía, con el objeto de conocer las condiciones de estabilidad del mismo y así evitar problemas de deslizamiento, asentamientos, desplazamientos y otros.

2.3.2 Terracería.

Se llama terracería al conjunto de obras compuestas de cortes y terraplenes, formada principalmente por la sub-rasante y el cuerpo del terraplén, constituida generalmente por materiales no seleccionados y se dice que es la subestructura del pavimento. Cuando se va a construir un camino que presente un TPDA (Tránsito Promedio Diario Anual) mayor a 5000 vehículos, es necesario que se construya bajo la sub-rasante una capa conocida como sub-yacente; la cual deberá tener un espesor mínimo de 50 cm.

2.3.3 Subrasante.

Los últimos 30 cms. De una terracería de corte o terraplén se conoce como Subrasante. Esta capa es muy importante para los pavimentos y constituyen su cimiento. Generalmente esta formada por el mismo suelo de la terracería. Es muy importante que el nivel de aguas freáticas este cuando menos a 1.50 m., debajo de ésta, esto se consigue drenando el subsuelo o elevando la Subrasante.

Para diseñar adecuadamente un pavimento principalmente los de tipo flexible, se deben hacer extensos estudios del suelo de la Subrasante, tanto en el campo como en el

laboratorio. Comprende estudios de topografía, geología del ambiente y sobre todo de mecánica de suelos.

La función de la sub-rasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad. Las características con las que debe cumplir son: f máximo de 3", expansión máxima del 5%, grado de compactación mínimo del 95%; espesor mínimo de 30cm para caminos de bajo tránsito y de 50cm en caminos con un TPDA > de 2000 vehículos. Otra de las funciones de la sub-rasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

2.3.4 Subbase.

Cumple una cuestión de economía ya que nos ahorra dinero al poder transformar un cierto espesor de la capa de base a un espesor equivalente de material de sub-base (no siempre se emplea en el pavimento), impide que el agua de las terracerías ascienda por capilaridad y evitar que el pavimento sea absorbido por la sub-rasante. Deberá transmitir en forma adecuada los esfuerzos a las terracerías.

2.3.4.1 Principales funciones de la Subbase.

- Transmitir los esfuerzos a la capa Subrasante en forma adecuada.
- Constituir una transmisión entre los materiales de la base y de la subrasante de tal modo que se evite la contaminación y la interpenetración de dichos materiales.

- Disminuir efectos perjudiciales en el pavimento, ocasionados por cambios volumétricos y rebote elástico del material de las terracerías o del terreno de cimentación.
- Reducir el costo del pavimento, ya que es una capa que por estar bajo la base, queda sujeta a menores esfuerzos y requiere de especificaciones menos rígidas, las cuales pueden satisfacerse con materiales de un menor costo que el utilizado en la base.

2.3.5 Base.

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta es colocada sobre de ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de confinamiento. Regularmente esta capa además de la compactación necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para poder resistir las cargas del tránsito sin deformarse y además de transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante en una base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales. En el caso de la granulometría, no es estrictamente necesario que los granos tengan una forma semejante a la que marcan las fronteras de las zonas, siendo de mayor importancia que el material tenga un VRS (valor relativo de soporte) y una plasticidad mínima; además se recomienda no compactar materiales en las bases que tengan una humedad igual o mayor que su límite plástico.

2.3.5.1 Tipos de Base.

Actualmente puede considerarse dos tipos de bases:

- Base granular: De grava triturada y mezcla natural de agregado y suelo.
- Base estabilizada: Suelos con cemento Pórtland, cal o materiales bituminosos.

En las base granulares la estabilidad del material depende de la fricción interna y de su cohesión. Una base granular de buena calidad requiere unos materiales fracturados con granulometría continua, el conjunto de la capa debe estar correctamente compactado, drenado e impermeabilizado.

2.3.5.2 Principales funciones de la Base.

Las principales funciones de la base son:

- Soportar adecuadamente las cargas transmitidas por los vehículos a través de la carpeta y transmitir los esfuerzos a la subrasante, por medio de la subbase, de tal forma que no produzcan deformaciones perjudiciales en el pavimento.
- Drenar el agua que se introduce por medio de grietas en la carpeta o por los hombros evitando también la ascensión capilar.

2.3.6 Carpeta.

La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

En las mezclas asfálticas, es de gran importancia conocer la cantidad de asfalto por emplearse, debiéndose buscar un contenido óptimo; ya que en una mezcla este elemento forma una membrana alrededor de las partículas de un espesor tal que sea suficiente para resistir los efectos del tránsito y de la intemperie, pero no debe resultar muy gruesa ya que además de resultar antieconómica puede provocar una pérdida de la estabilidad en la carpeta, además este exceso de asfalto puede hacer resbalosa la superficie. El tipo y espesor de una carpeta asfáltica se elige de acuerdo con el tránsito que va a transitar por ese camino.

2.4 CLASIFICACION DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.

El concepto de pavimento flexible nace del hecho de que una superficie bituminosa es plástica y fluye bajo cargas repetidas y sostenidas (repetitivas y temporales) dentro de los límites, la superficie bituminosa, se ajustan a la consolidación de las capas inferiores. La mezcla bituminosa es una combinación de agregados pétreos, de calidad y características especificadas y asfaltos líquidos o cementos asfálticos funcionando como aglutinante. Los pavimentos flexibles se pueden clasificar por el tipo de mezcla bituminosa que lo compone, estas mezclas pueden ser:

- Mezclas asfálticas en frío
- Mezclas asfálticas en caliente
- Tratamiento superficial
- Macadam Asfáltico.

2.4.1 Mezcla asfáltica en frío.

Es la combinación de agregados y un ligante bituminoso que pueden mezclarse, extenderse y compactarse a temperatura ambiente. En alguna ocasión el agregado puede llegar a calentarse ligeramente.

Estas mezclas emplean en su fabricación ligantes bituminosos con menor viscosidad que las mezclas en caliente, betunes fluidificados, alquitranes fluidos o emulsiones asfálticas. El mezclado se puede efectuar “In Situ” o en plantas mezcladoras fijas.

2.4.2 Mezcla asfáltica en caliente.

Es una mezcla completa de agregados gruesos, finos y un ligante bituminoso. Estos materiales son combinados en una planta de mezclado, donde son calentados, proporcionados y mezclados para producir una mezcla homogénea.

2.4.3 Tratamiento superficial.

Los tratamientos superficiales con asfalto pueden utilizarse para cumplir las siguientes funciones:

- Proveer una superficie de bajo costo para toda condición del tiempo atmosférico, en caminos de categoría ligera y mediana.
- Sellar una superficie de rodamiento existente.
- Ayudar a un revestimiento sobrepuesto a adherirse al revestimiento previo.
- Proveer una superficie resistente al deslizamiento.
- Rejuvenecer las superficies existentes deterioradas por el intemperismo.

- Proveer una cubierta temporal para una nueva base granular que no va a recibir su cubierta final por un amplio período.
- Cubrir los pavimentos existentes y proveer cierto aumento en resistencia.
- Servir como paliativo para el polvo.
- Guiar el tráfico y mejorar la visibilidad en la noche; por ejemplo, a través de agregados con contraste en colores.

Los tipos de tratamientos para superficies con asfalto incluyen los siguientes: tratamientos de superficie simple, que consiste en una aplicación de material asfáltico cubierta con una capa de agregado, estos tratamientos asfálticos también llamados en monocapa se usan como capas de protección sobre bases flexibles o semirígidas para tráfico liviano o como pavimento provisional sobre bases destinadas a soportar tráfico pesado mientras se construye la carpeta asfáltica definitiva, y también existe el tratamiento superficial múltiple que resulta de repetir dos o más veces el procedimiento constructivo de los tratamientos de una capa. Generalmente se disminuye el tamaño del agregado a medida que la capa se construye es más superficial. El tipo más empleado es el de las dos capas, que se conoce también como tratamiento superficial de doble riego y tiene su aplicación más frecuente como pavimento provisional en carreteras para tráfico mediano o pesado que se construye por etapas.

Es un termino que cubre en general todas las aplicaciones del asfalto, con o sin agregados a cualquier tipo de camino o superficie de pavimentos, pero cuyo espesor final es por lo general inferior a 25 mm. (1 pulgada).

También existen otros tipos de tratamientos superficiales como: las lechadas asfálticas, que sirven para proteger contra la infiltración del agua superficial a la carpeta si está agrietada o porosa, proporcionar un revestimiento antideslizante al pavimento antiguo u obtener una superficie de un color determinado. En todos los casos el proceso constructivo es el mismo y consiste en regar sobre la superficie existente una pequeña cantidad de material asfáltico de acuerdo con dosificaciones establecidas previamente.

2.4.4 Macadán asfáltico.

Es el tipo más antiguo de los pavimentos para carreteras actualmente en uso. El Macadam Asfáltico, por penetración consiste en una base o una superficie de rodamiento de piedra triturada o escoria de un solo tamaño en la que los fragmentos están ligados con asfalto. Se emplea como capa superficial para caminos de tránsito medio a pesado, pero para caminos de tránsito pesado ha sido sustituido por el concreto asfáltico. Para su construcción puede ser utilizado cemento asfáltico y asfalto emulsionado o uno de los grados mas pesados de los alquitranes para caminos.

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.

2.5.1 Ventajas.

- Fácil financiamiento por su bajo costo inicial.
- La construcción como las operaciones de mantenimiento se realizan en un tiempo mucho mas corto.
- La marcha de los vehículos automotores es más suave por no tener juntas de unión.

- Pueden utilizarse nuevamente como base los pavimentos existentes cuando se coloque una nueva capa de rodaje.

2.5.2 Desventajas.

- Ocasionan mayores gastos en el mantenimiento.
- En época de invierno los daños son considerables y mas costosas las operaciones de mantenimiento.

2.6 ASPECTOS IMPORTANTES DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Entre los aspectos más importantes de un pavimento tenemos: la vida de un pavimento y los efectos de uso del pavimento (mecanismos de transición).

2.6.1 Vida de un pavimento flexible.

El deterioro continuo y permanente de una vía comienza en el momento en que finaliza su construcción. Al examinar el comportamiento de los pavimentos flexibles, se puede dividir su vida en tres fases:

1. Fase de Consolidación: Esta es la fase inicial en la vida de un pavimento flexible, donde sus diversas capas sufren cierta consolidación, debido a las cargas transmitidas por las ruedas de los vehículos. Es una fase relativamente corta que tiende a estabilizarse rápidamente. Depende de la compactación que reciben las diversas capas durante la construcción y no debe ocurrir si ésta ha sido suficiente.

2. Fase Elástica: Inicia inmediatamente después de la fase anterior y corresponde a la vida útil del pavimento. Si ocurre la fase de consolidación, cada carga provoca una deformación de tipo permanente, que luego tiende a transformarse en deformación transitoria de recuperación instantánea de tipo elástico, provocando cada rueda un movimiento vertical hacia abajo (deflexión), que se recupera después de pasar el vehículo (rebote).

Durante la fase elástica no se presentan fallas generalizadas en el pavimento, salvo deformaciones o fallas locales por defectos de materiales, exceso de humedad, etc. En esta fase, las deformaciones elásticas causadas por las cargas, producen esfuerzos de tensión en las capas asfálticas y de compresión en las capas granulares.

La vida de un pavimento depende de esta fase, de su duración, lo cual esta íntimamente ligado a las deflexiones que pueda sufrir el pavimento. Los estudios de los pavimentos en servicio han demostrado que aquellos que presentan deflexiones reducidas, tienen generalmente una vida larga, aconteciendo lo inverso cuando estas son elevadas.

3. Fase de Fatiga: Es la fase final en la vida de la estructura. Las deflexiones causadas por el constante paso de las ruedas de los vehículos provocan tensiones de tracción en los revestimientos asfálticos, que vienen acumulándose desde la fase elástica hasta que la capa se rompe por fatiga después de cierto número de pasadas, momento a partir del cual comienza un colapso gradual en toda la vía requiriéndose prácticamente una reconstrucción de la misma. La rotura por fatiga

se inicia con la aparición de grietas longitudinales las cuales con el paso repetido del tránsito y la penetración de las aguas superficiales al interior del pavimento provocan el colapso de la estructura llegando al pavimento al final de su vida útil.

2.6.2 Mecanismos de deformación.

Toda carga vehicular sobre un pavimento produce una deformación, la cual puede ser transitoria o permanente.

- Transitorias: Es aquella que desaparece cuando se retira la carga. Si la recuperación es instantánea se dice que la deformación es elástica. Si por el contrario, transcurre cierto tiempo desde que se retira la carga hasta recuperar la condición inicial se dice que ésta es visco elástica.
- Permanente: Es aquella que se mantiene aun después de haber retirado la carga. Dentro de este tipo se encuentran las deformaciones: por consolidación, plásticas y por expansión.
 - Por consolidación: Consiste en la reducción en el espesor de algunas de las capas del pavimento. Con un cambio correspondiente de volumen. Generalmente esta deformación se debe a una compactación insuficiente de la capa que falla y se caracteriza por no presentar grietas, pero produce incomodidad al tránsito.
 - Plástica: Consiste en una falla por esfuerzo de corte debido a que las cargas aplicadas exceden la capacidad de soporte de la estructura del pavimento. Se

caracteriza por una alteración en la superficie del pavimento sin que ocurra cambio en su volumen.

- Por expansión: Consiste en un cambio de volumen del pavimento debido a variaciones en el contenido de humedad del suelo de fundación. Se produce por el empleo de materiales inadecuados trabajados incorrectamente durante la construcción.

2.6.3 Categorías de mantenimiento.

Los trabajos de conservación vial están agrupados en las siguientes cinco categorías generales:

- ✓ Mantenimiento rutinario,
- ✓ Mantenimiento periódico,
- ✓ Mantenimiento preventivo,
- ✓ Mantenimiento a costo más porcentaje por administración / administración delegada
- ✓ Mantenimiento de emergencia.

1. El mantenimiento rutinario, comprende todas aquellas actividades requeridas para conservar una vía de regular a buen estado, las cuales se repiten una o más veces al año. También, incluye aquellas labores de reparación vial destinadas a recuperar elementos menores dañados, deteriorados o destruidos, tal como los barandales de puentes, obras

de drenaje menores, señalización vertical y horizontal, muros de retención y actividades afines.

2. El mantenimiento periódico, abarca las obras de conservación vial que se repiten en períodos de más de un año para mantener la vía a un nivel de servicio de regular a buen estado. Asimismo, abarca las mejoras geométricas requeridas para una sección puntal, conforme a los requisitos estipulados en la última versión del manual Centroamericano de Especificaciones para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales.

También, está considerada la colocación de sobrecapas sobre pavimentos deteriorados existentes.

El mantenimiento periódico se refiere a las obras de mantenimiento programadas con una frecuencia superior a un año. Las obras de mantenimiento periódico incluyen:

- Reposición de balasto en carreteras no pavimentadas.
- Aplicación de sellos sobre pavimentos asfálticos
- Aplicación de tratamientos especiales tales como lechada Asfáltica.
- Colocación de sobrecapas de asfalto (reapeo) sobre el pavimento existente con el objeto de restaurarla a su estado original.
- Aplicación de tratamientos especiales tales como **EL RECICLAJE** de pavimentos existentes.

Dichas obras por lo general se contratan basándose en precios unitarios y, por ende, no forman parte de contratos de mantenimiento por estándares.

3. El mantenimiento preventivo, consiste en actividades y obras de mantenimiento destinadas a prevenir fallas en la vía antes de que ocurra.

Tratamientos aplicados a la superficie de pavimentos existentes con capacidad estructural suficiente, con el propósito de mantener su estructura y prolongar su vida útil sin incrementar su valor estructural.

Actualmente el mantenimiento vial en Centroamérica está enfocado a la reparación de fallas mediante la programación de mantenimiento rutinario. Se debe cambiar al enfoque hacía el mantenimiento preventivo mediante, lo cual se aplican las providencias necesarias para evitar que las fallas ocurran. Las experiencias en otros países han comprobado que la implantación de programas de mantenimiento preventivo conllevan economías sustanciales. El programa de mantenimiento preventivo abarca intervenciones tales como:

- Lechada Asfáltica (Slurry Seals)
- Tratamientos Superficiales
- Micro-Superficies
- Sobrecapas asfálticas delgadas
- Sello de grietas y juntas en pavimentos de concreto hidráulico.
- Reparación parcial y entera de losas de concreto
- **Fresado y reciclaje** de pavimentos bituminosos
- **Reciclaje** de pavimentos asfálticos

Algunas de estas intervenciones han sido aplicadas en el ámbito Centroamericano desde hace muchos años. Otras son de recién aplicación o desconocidas. La mayoría de dichas intervenciones pueden considerarse como mantenimiento periódico dado que su aplicación se extiende a intervalos mayores de un año.

La clave en cada caso es de aplicar los tratamientos mientras que el pavimento todavía esté en regulares condiciones sin fallas mayores que comprometan la capacidad de soporte del pavimento. Afortunadamente, existen procedimientos tales como la rugosidad cuando combinado con programas de administración de pavimentos, permitan predecir cuando se debe aplicar dichas intervenciones y hasta cierto punto define la intervención más adecuada para el caso.

El problema estriba en que existe cierta renuencia por parte de las autoridades competentes de asignar los fondos necesarios para aplicar dichos tratamientos sobre carreteras que todavía están en bueno o regular estado cuando la mayor parte de la red está todavía en malas o pésimas condiciones. No es sino hasta que la deterioración del pavimento ha fallado que se piensa en rehabilitarla. Para ese entonces el mantenimiento preventivo ya no es una opción viable.

4. El mantenimiento por administración a costo más porcentaje, habrá casos para los cuales los trabajos de mantenimiento a realizarse no se pueden cuantificar, no exista una partida de pago en el contrato para cubrirlos o son para ejecutar obras de emergencia o no previstas. En estos casos es necesario proceder con la modalidad de trabajos por

administración mediante el cual el pago por todos los trabajos realizados y mano de obra o materiales provistos se efectúa sobre una base de costo más porcentaje.

5. *El mantenimiento de emergencia*, son las actividades y las intervenciones aplicadas en forma urgente que se realizan como consecuencia de fuerza mayor, tal como el caso de desastres naturales, con el propósito de habilitar la vía permitiendo así el paso vehicular.

2.7 CONCEPTOS BÁSICOS DE RECICLAJE DE PAVIMENTOS.

2.7.1 Que es reciclar.

Proceso simple o complejo que sufre un material o producto para ser REINCORPORADO, a un ciclo de producción o de consumo.

2.7.2 Porqué reciclar

- Proceso simple que ayuda a resolver muchos problemas creados por la vida moderna.
- Se salvan grandes cantidades de RECURSOS NO RENOVABLES.
- Genera economía favorable en los países.

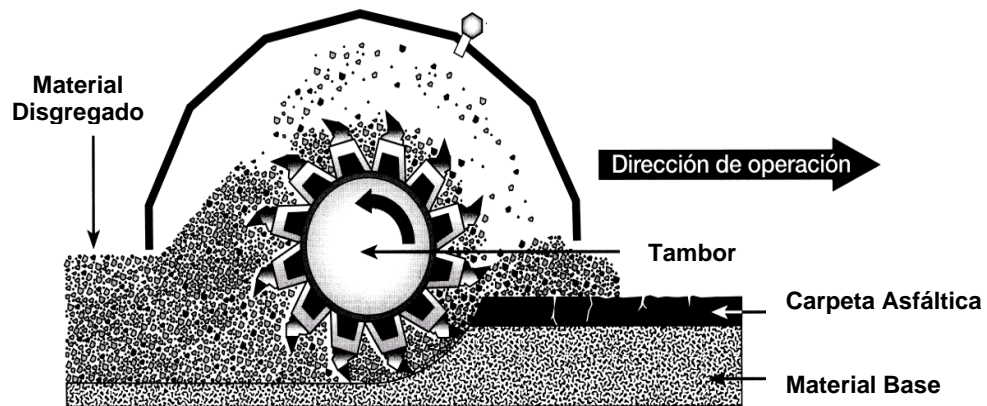


2.7.3 Que es el reciclaje de pavimentos

En la actualidad existen varios conceptos de reciclaje de pavimentos asfálticos entre los que podemos mencionar:

- El reciclado es una nueva alternativa técnica de rehabilitación de pavimentos, que consiste en la reutilización de los materiales en servicio, los que han perdido en gran parte sus propiedades iniciales y cuyas características se desean mejorar.

PROCESO DE RECICLAJE



En la siguiente fotografía se muestra todo un tren de reciclaje.



- También es el procedimiento de ingeniería mediante el cual se emplea parte o la totalidad de una estructura de pavimentos bituminosos en la fabricación de una mezcla asfáltica de calidad superior a la existente o en la estabilización de sus capas granulares.
- El reciclaje de pavimento asfáltico es una tecnología especial que permite la reconstrucción de pavimentos envejecidos y/o deteriorados, empleando sus materiales de construcción originales. Esto es posible en la medida en que no haya llegado a un grado de degradación tal que no permita un rejuvenecimiento eficiente.

2.7.4 Ventajas del reciclaje de pavimentos

- Posibilita la mejora estructural del pavimento existente.
- Permite el uso de refinada técnica de control de calidad.
- Es aplicable a la solución de todos los problemas que afectan la capacidad resistente del pavimento.
- Facilita la eliminación de grietas reflejas.
- Permite corregir los diseños y/o elaboración incorrecta de las mezclas asfálticas existentes.
- Reduce los costos de reconstrucciones y obras de refuerzo estructural.
- Produce un efecto de conservación de las fuentes de materiales viales, de energía y de menor utilización de los caminos para el transporte de materiales viales.
- Permite la utilización de rejuvenecedores y/o mejoradores de cemento asfáltico, lo que confiere una mas larga vida de comportamiento visco-elástico de los pavimentos.
- Posee un menor grado de impacto ambiental.

2.7.5 Técnicas de reciclaje

Existen dos grupos:

1. **El reciclado en frío:** Generalmente in-situ, adolece de limitaciones técnicas en lo referente al logro de refinados y precisos procesos constructivos, por lo que produce estructuras de inferior calidad que las elaboradas con materiales de alta calidad.

2. **El reciclado en caliente:** producen estructuras de alta calidad comparables a los de los pavimentos realizados con materiales de alta calidad nuevas, elaboradas en caliente.

Se realiza según dos metodologías distintas, una in-situ y la otra realizada en planta.

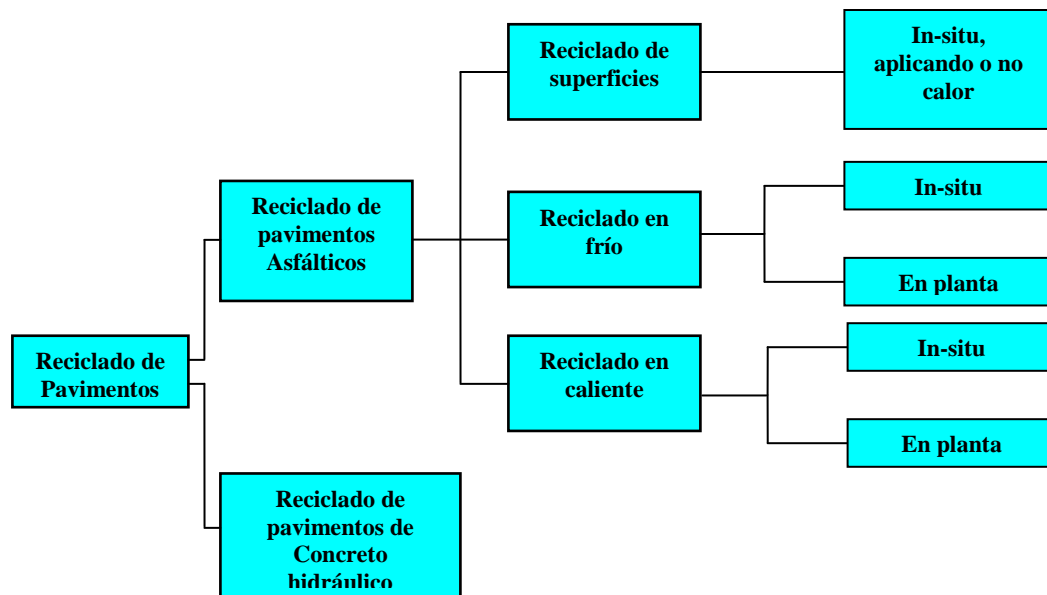


Fig. N°2, Clasificación general de reciclado de pavimentos³

³ Basado en la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO.

En los próximos capítulos trataremos a fondo la clasificación de reciclado de pavimentos mencionados anteriormente.

2.7.6 Que es mezcla reciclada

La mezcla de concreto asfáltico reciclada es la preparada usando agregados recuperados, mezcla asfáltica recuperada, agregado nuevo, ligante asfáltico nuevo, agente de reciclaje y aditivos (si son necesarios).

CAPITULO III

DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

3.0 DAÑOS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES⁴

3.1 INTRODUCCION

En el presente capítulo se tratarán los daños que le ocurren a los pavimentos flexibles, además de una descripción detallada de estos y cuáles son las causas que los producen para que al final de cada ítem se dará una muestra fotográfica de estos deterioros que sufren estas clases de pavimentos para así poder diferenciarlos unos de otros.

Luego de darlos a conocer se presentarán los diferentes niveles de severidad que estos pueden presentar y la forma más correcta de cómo debe realizarse su medición para no tener dudas a la hora de clasificarlos y de esta forma poder darle un adecuado mantenimiento a la vía.

El objetivo de dar a conocer los diferentes tipos de daños, las causas que lo producen y como clasificarlos radica en que desempeñan un papel sumamente importante para definir el tipo de rehabilitación más apropiada incluyendo que tipo de reciclaje se deberá aplicar para exitoso un proyecto.

3.2 FISURAS Y GRIETAS

3.2.1 Fisura piel de cocodrilo

Descripción: Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanzan su valor máximo, cuando el pavimento es

⁴ Extraído de las especificaciones SIECA

solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente, como una serie de fisuras longitudinales paralelas; luego por efecto de la repetición de, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo. Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. Si la base y la sub-base son débiles, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos. Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera estancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache. La misma sección del pavimento presentara fisuras y grietas de cocodrilo, ahuellamiento y baches.

Posibles causas: Son causadas por la fatiga que sufren las capas asfálticas al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

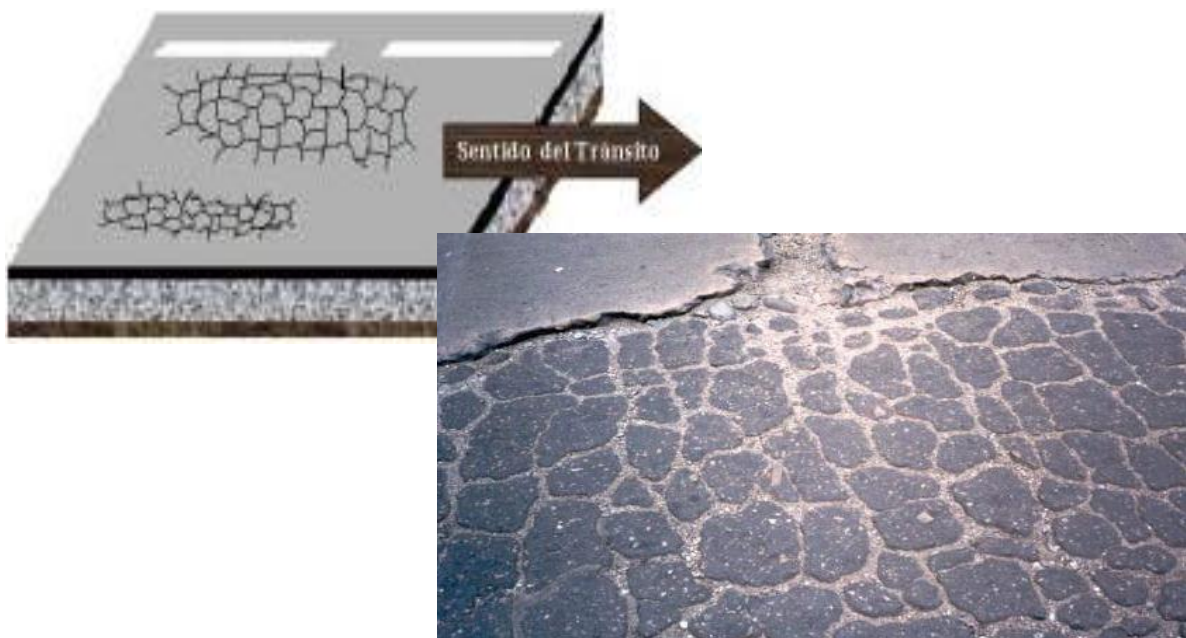
- **B (Bajo)** Fisuras muy finas, menores de 2 mm de ancho, paralelas con escasa interconexión, dando origen a polígonos de cierta longitud; los bordes de las fisuras no presentan despostillamiento.
- **M (Mediano)** Fisuras finas a moderadas, de ancho menor a 5 mm, interconectadas formando polígonos pequeños y angulosos, que pueden presentar un

moderado despostillamiento en correspondencia con las intersecciones.

➤ **A (Alto)** La red de fisuras ha progresado de manera de constituir una malla cerrada de pequeños polígonos bien definidos, con despostillamientos de severidad moderada a alta, a lo largo de sus bordes; algunas de estas piezas pueden tener movimientos al ser sometidas al tránsito y/o pueden haber sido removidas por el mismo formando baches.

Medición: Las fisuras Piel de Cocodrilo se miden en metros cuadrados de superficie afectada. La mayor dificultad en la medición radica en que dos o hasta tres niveles de severidad pueden existir dentro de una misma área fallada. Si estas porciones pueden ser distinguidas fácilmente, una de otra, se miden y registran separadamente. Si los distintos niveles de severidad no pueden ser divididos fácilmente, la totalidad del área se califica con la mayor severidad observada.

Fig. 3.1 Piel de cocodrilo



3.2.2 Fisuras en bloque

Descripción: Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². La fisura en bloque se presenta normalmente en un gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

Posibles causas: Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. También suelen ocurrir en pavimentos bituminosos colocados sobre bases granulares estabilizadas o mejoradas con cemento portland, que se producen a raíz de la contracción eventual de la capa estabilizada, que se reflejan en la superficie del pavimento. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura o en la base y sub-base. La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción. También se debe a cambios de volumen del agregado fino de las mezclas asfálticas con un ligante de penetración baja. Por lo general, el origen de estas fisuras no está asociado a las cargas de tráfico; sin embargo, dichas cargas incrementan la severidad de las fisuras. La presencia de fisuras en bloques generalmente es indicativa de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Existen algunas de las siguientes condiciones:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio a 2 mm con presencia de despostillamiento menor.

- Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- **M (Mediano)** Existen algunas de las siguientes condiciones
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 2 y 5 mm.
 - Fisuras sin sellar de ancho promedio menor de 5 mm con presencia de despostillamiento menor.
 - Fisura sellada de cualquier ancho, sin despostillamiento o cuando éste es breve, pero el material de sello esta en condiciones insatisfactorias.
- **A (Alto)** Existen algunas de las siguientes condiciones:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio a 5 mm.
 - Fisuras con presencia de despostillamientos severos.

Medición: Las fisuras en bloque se miden en metros cuadrados de superficie afectada. Normalmente ocurre a un nivel de severidad en una sección del pavimento, pero cuando se observe diferentes niveles de severidad se miden y registran separadamente, en caso que no se puedan diferenciar, la totalidad del área se califica con la mayor severidad observada.

Fig. 3.2 Fisuras en bloque



3.2.3 Fisuras en arco

Descripción: Son fisuras en forma de media luna (o más precisamente de cuarto creciente) que apuntan en la dirección de las fuerzas de tracción de las ruedas sobre el pavimento. Las fisuras en arco no necesariamente apuntan en el sentido del tránsito. Por ejemplo, si se frena el vehículo cuesta abajo, la dirección de la fisuras está cuesta arriba.

Posibles causas: Se producen cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento. Esto ocurre generalmente cuando se combinan una mezcla asfáltica de baja estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento. La falta de riego de liga, un exceso de ligante o la presencia de polvo durante la ejecución de los riegos, son factores que con frecuencia conducen a tales fallas. Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos. La causa también puede ser un contenido alto de arena en la mezcla, sea arena de río o finos triturados.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) según las características de la fisura y el estado del pavimento que las rodea, de acuerdo con la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Las fisuras son de ancho promedio inferior a 3 mm.
- **M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Las fisuras son de ancho promedio entre 3 y 6 mm.
 - El área alrededor de las fisuras se encuentran fracturadas por las piezas que se encuentran bien ligadas y firmes aún.
- ➔ **A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
- Fisuras de ancho promedio mayor de 6 mm.
 - El área alrededor de las fisuras se encuentran fracturadas en trozos fácilmente removibles o que han desaparecido casi completamente.

Medición: El área asociada con una determinada "fisura de arco" se mide en metros cuadrados, calificándolo de acuerdo con el máximo nivel de severidad observado en dicha área. Se totalizan los metros cuadrados afectados en la sección o muestra, separadamente según el nivel de severidad.

Fig. 3.3 Fisuras en arco



3.2.4 Fisura transversal

Descripción: Fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento.

Posibles causas: Las posibles causas incluyen:

- i. Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, debido a un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc. Particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.
- ii. Reflexión de grietas en la capa subyacente, incluyendo pavimentos de concreto, con excepción de la reflexión de sus juntas.
- iii. Defectuosa ejecución de las juntas transversales de construcción de las capas asfálticas de superficie.

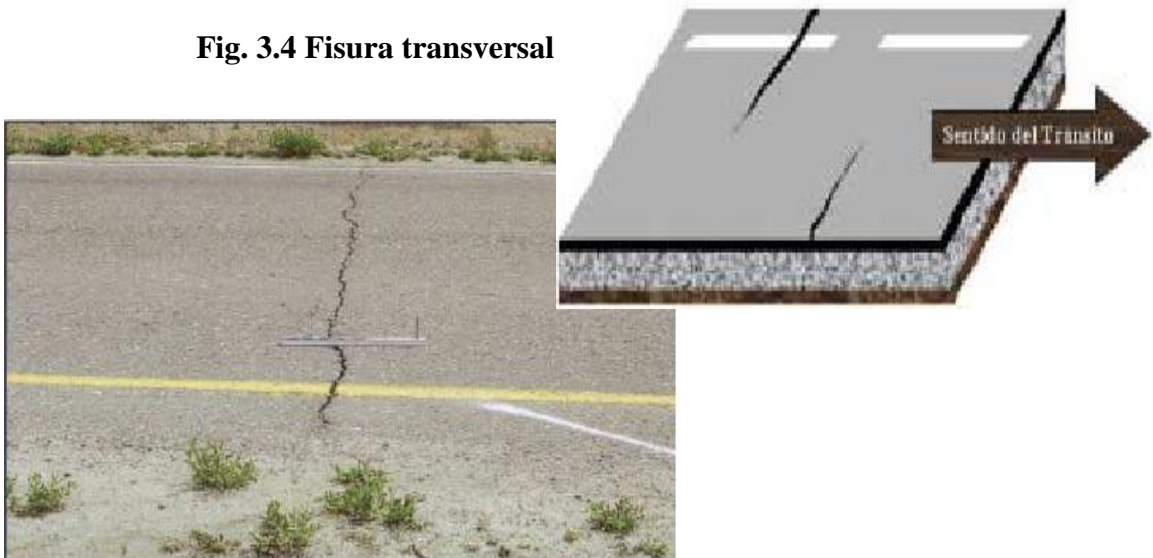
Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio inferior a 3 mm sin ramificaciones.
 - Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición satisfactoria.
- **M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 3 y 6 mm.
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio menor de 6 mm que evidencian ramificaciones, es decir rodeadas de fisuras finas erráticas,
 - Fisuras selladas, de cualquier tipo, rodeadas de fisuras erráticas.
- **A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
- Fisuras sin sellar de ancho promedio mayor de 6 mm.
 - Cualquier fisura, sellada o no, con ramificaciones constituidas por fisuras erráticas, moderadas a severas, próximas a la misma, con tendencia a formar una malla, o bien, que evidencien un despostillamiento severo.

Medición: Las fisuras transversales se miden en metros lineales. La longitud y severidad de cada fisura debe registrarse después de su identificación. Si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción evidenciando un diferente nivel de severidad, debe ser registrada separadamente. Se totaliza el número de metros lineales observados en la sección o muestra.

Fig. 3.4 Fisura transversal



3.2.5 Fisura longitudinal

Descripción: Fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable.

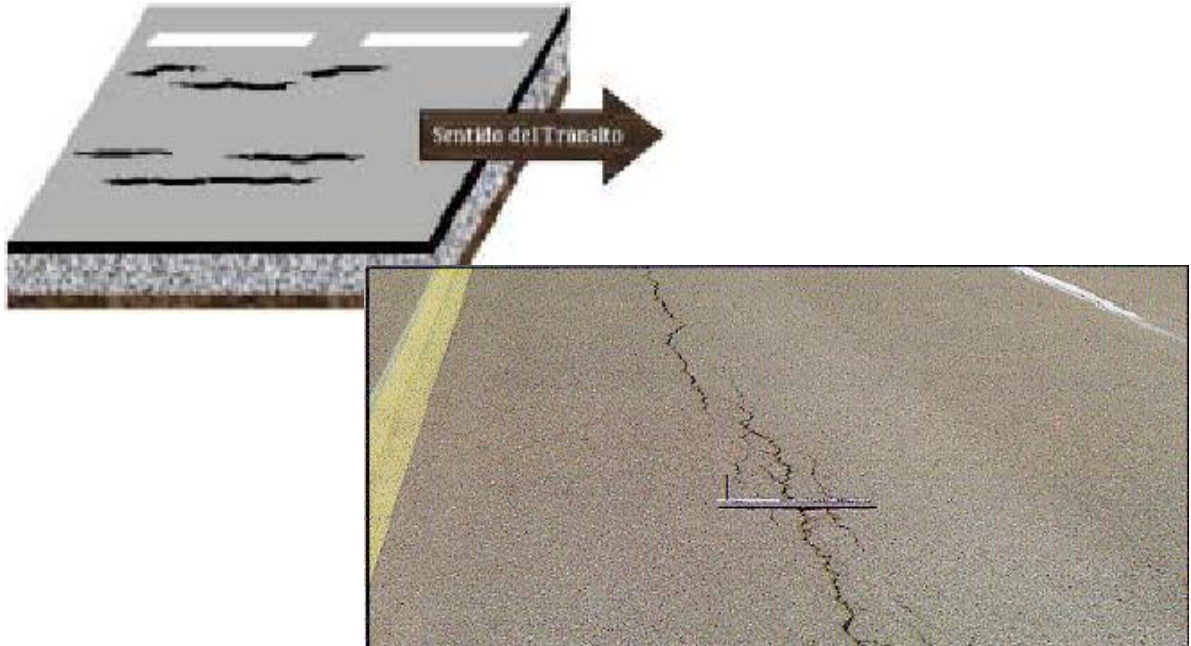
Posibles causas: Las posibles causas incluyen:

- i. Instancias iniciales del fenómeno de fatiga por debilidad estructural, ocurren en las huellas de canalización del tránsito.
 - ii. Defectuosa ejecución de las juntas longitudinales de construcción, al distribuir las mezclas asfálticas durante la construcción; ocurren en el eje y coincidencia con los carriles de distribución y ensanches.
 - iii. Contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, particularmente ante gradientes térmicos importantes.
 - iv. Reflexión de fisuras causadas por grietas existentes por debajo de la superficie de rodamiento; incluyendo fisuras en pavimentos conformadas por capas estabilizadas químicamente o de concreto, usualmente se presentan combinadas con fisuras transversales.
 - v. Deficiente confinamiento lateral, por falta de hombros y cordones o bordillos, que provocan un debilitamiento del pavimento en correspondencia con el borde. Estas, asociadas a las cargas del tránsito, ocurren a una distancia de 0.30 a 0.60 m del borde.
- Niveles de severidad:** Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo a las características de las fisuras, según la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio inferior a 3 mm sin ramificaciones.
 - Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condición satisfactoria.
- **M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 3 y 6 mm.
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio menor de 6 mm que evidencian ramificaciones, es decir rodeadas de fisuras finas erráticas.
 - Fisuras selladas, de cualquier tipo, rodeadas de fisuras erráticas.
- **A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar de ancho promedio mayor de 6 mm.
 - Cualquier fisura, sellada o no, con ramificaciones constituidas por fisuras erráticas, moderadas a severas, próximas a la misma, con tendencia a formar una malla, o bien, que evidencien un despostillamiento severo.

Medición: Las fisuras longitudinales se miden en metros lineales. La longitud y severidad de cada fisura debe registrarse después de su identificación. Si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción evidenciando un diferente nivel de severidad, debe ser observada en la sección o muestra.

Fig. 3.5 Fisura Longitudinal



3.2.6 Fisura por reflexión de junta

Descripción: Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación ascendente hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales y/o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

Posibles causas: Son causadas principalmente por el movimiento de las losas de concreto, como resultado de cambios de temperaturas o cambios en los contenidos de

humedad. Las grietas por reflexión se propagan dentro de la capa asfáltica, como consecuencia directa de una concentración de tensiones; así mismo, si por la aplicación de las cargas de tránsito las losas experimentan deflexiones verticales importantes en las juntas, la reflexión se produce con mayor rapidez. El tránsito puede producir la rotura de la capa asfáltica en la proximidad de las fisuras reflejadas, resultando en peladuras y eventualmente baches.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (bajo, mediano, alto) de acuerdo a las características de las fisuras, según la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio inferior a 5 mm sin descascaramiento o despostillamiento de sus bordes.
 - Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria; no provocan golpeteo cuando se circula en vehículo sobre el pavimento.
- **M (Mediano)** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 5 y 15 mm.
 - Fisuras sin sellar, hasta 5 mm de ancho y/o selladas de cualquier ancho, que evidencien leve despostillamiento de sus bordes y/o están rodeadas por fisuras erráticas leves muy próximas.
 - La fisura provoca un significativo golpeteo al vehículo cuando se circula sobre el pavimento.
- **A (Alto)** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Cualquier fisura, sellada o no, rodeada por un moderado o severo agrietamiento de la superficie, o que evidencie rotura y desprendimiento de parte del material asfáltico en la proximidad de la misma.
- Fisuras sin sellar de ancho promedio mayor a 15 mm.
- La fisura provoca un severo golpeteo en el vehículo cuando se circula sobre el pavimento.

Medición: Las fisuras por reflexión de juntas se miden en metros lineales. La longitud y nivel de severidad de cada fisura se registra separadamente; se totalizan los metros lineales registrados para cada nivel de severidad en la sección.

Fig. 3.6 Fisura por reflexión de junta.



3.3 DEFORMACIONES SUPERFICIALES.

3.3.1 Ahuellamiento

Descripción: Depresión longitudinal continua a lo largo del rodamiento del tránsito, de longitud mínima de 6 m.

Posibles causas: Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante. Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en la subrasante. Las deformaciones resultan de una compactación o movimiento lateral de los materiales (fluencia plástica o punzonamiento por corte), ambos por efecto de tránsito. El ahuellamiento indica una insuficiencia estructural del pavimento o una deficiente estabilidad del sistema subrasante-pavimento. En algunos casos se hace más evidente cuando la mezcla asfáltica se desplaza formando un cordón a cada lado del área deprimida. Las causas posibles incluyen:

- i. Las capas estructurales pobremente compactadas.
- ii. Inestabilidad en bases y sub-bases granulares, creada por la presión del agua o saturación de la misma.
- iii. Mezcla asfáltica inestable
- iv. Falta de apoyo lateral por erosión del hombro.
- v. Capacidad estructural del pavimento con espesores deficientes de las capas que lo integran.

- vi. Técnica de construcción pobre y un bajo control de calidad.
- vii. Utilización de materiales no apropiados o de mala calidad.
- viii. La acción del tránsito (sobrecargas y altos volúmenes de tránsito no previstos en el diseño original).
- ix. El acompañamiento por levantamientos adyacentes a los ahuellamientos, que indica que hay fallas en las capas superiores del pavimento.
- x. Estacionamiento prolongado de vehículos pesados.
- xi. Exceso de ligantes de riegos.

Niveles de severidad: La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, midiendo ésta con una regla de 1.20 m de longitud colocada transversalmente al eje de la carretera; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los resultados obtenidos a intervalos de 3 m a lo largo de la huella.

Se identifican tres niveles de severidad:

- **B (Bajo)** La profundidad promedio es menor de 10 mm.
- **M (Mediano)** La profundidad promedio es entre 10 y 25 mm.
- **A (Alto)** La profundidad promedio es mayor de 25 mm.

Medición: Las fisuras por reflexión de juntas se miden en metros lineales. La longitud y nivel de severidad de cada fisura se registra separadamente; se totalizan los metros lineales registrados para cada nivel de severidad en la sección.

Fig. 3.7 Daño por ahuellamiento



3.3.2 Corrimiento.

Descripción: Distorsiones de la superficie del pavimento por desplazamiento de la mezcla asfáltica, a veces acompañados por levantamientos de material formando "cordones", principalmente laterales, o bien por desplazamiento de la capa asfáltica sobre la superficie subyacente, generalmente acompañada de un levantamiento hacia el eje de la carretera. Típicamente puede identificarse a través de la señalización horizontal del pavimento, observando demarcación de los carriles, por efecto de corrimiento.

Posibles causas: Los desplazamientos son ocasionados por las cargas del tránsito, actuando sobre mezclas asfálticas poco estables, ya sea por exceso de asfalto, falta de vacíos, o bien, por falta de confinamiento lateral. La inadecuada ejecución del riego de

liga o imprimación no permite una adecuada adherencia entre la capa asfáltica de rodadura y la subyacente, originando mayor posibilidad de corrimiento.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) según la siguiente guía:

- **B (Bajo)** El corrimiento es perceptible, causa cierta vibración o balanceo en el vehículo, sin generar incomodidad.
- **M (Mediano)** El corrimiento causa una significativa vibración o balanceo al vehículo, que genera cierta incomodidad.
- **A (Alto)** El corrimiento causa a los vehículos un excesivo balanceo que genera una sustancial incomodidad y/o riesgo para la seguridad de circulación, siendo necesaria una sustancial reducción de la velocidad.

Medición: Los corrimientos se miden en metros cuadrados, registrando separadamente, de acuerdo a su severidad, el área total afectada en la muestra o sección.



3.3.3 Corrugación

Descripción: Serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1 m entre ellas, a lo largo del pavimento.

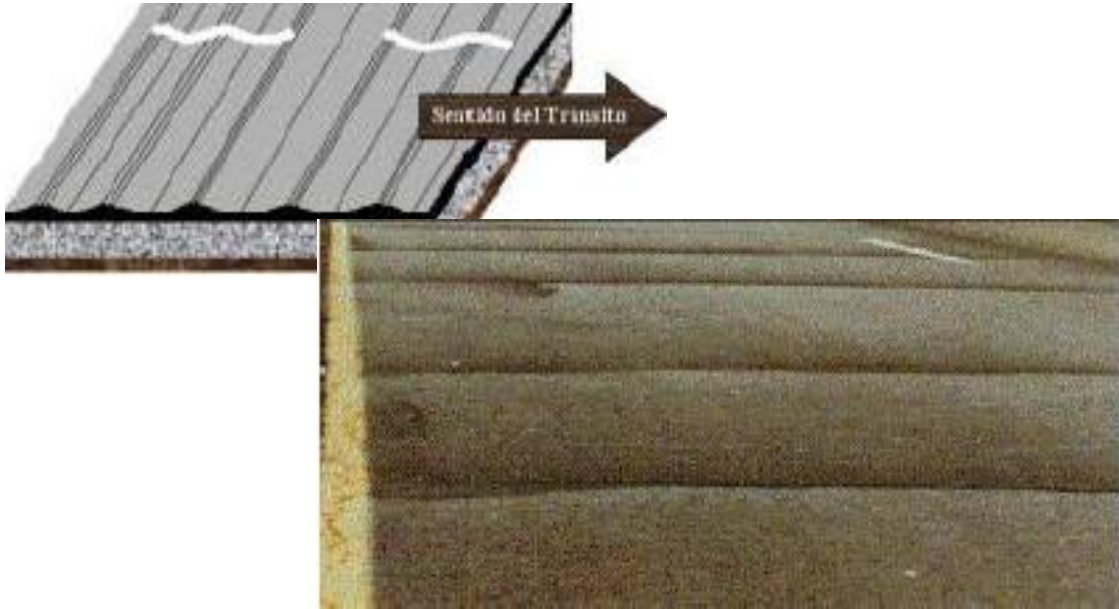
Posibles causas: Este tipo de falla es ocasionado por la acción del tránsito sobre las capas superficiales (carpeta o base del pavimento).

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) según la siguiente guía:

- **B (Bajo)** La corrugación causa cierta vibración en el vehículo, sin llegar a generar incomodidad.
- **M (Mediano)** La corrugación causa una significativa vibración en el vehículo, que genera cierta incomodidad.
- **A (Alto)** La corrugación causa una vibración excesiva y continua en el vehículo, que genera una sustancial incomodidad y/o riesgo para la circulación de vehículos, siendo necesaria una reducción en la velocidad por seguridad.

Medición: La corrugación se mide en metros cuadrados, registrando, de acuerdo a su severidad, el área total afectada en la muestra o sección.

Fig. 3.9 Daño por corrugación.



3.3.4 Hinchamiento

Descripción: Abultamiento o levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente en la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.

Posibles causas: Son causadas fundamentalmente por la expansión de los suelos de subrasante del tipo expansivo. En muchos casos pueden estar acompañadas por el fisuramiento de la superficie.

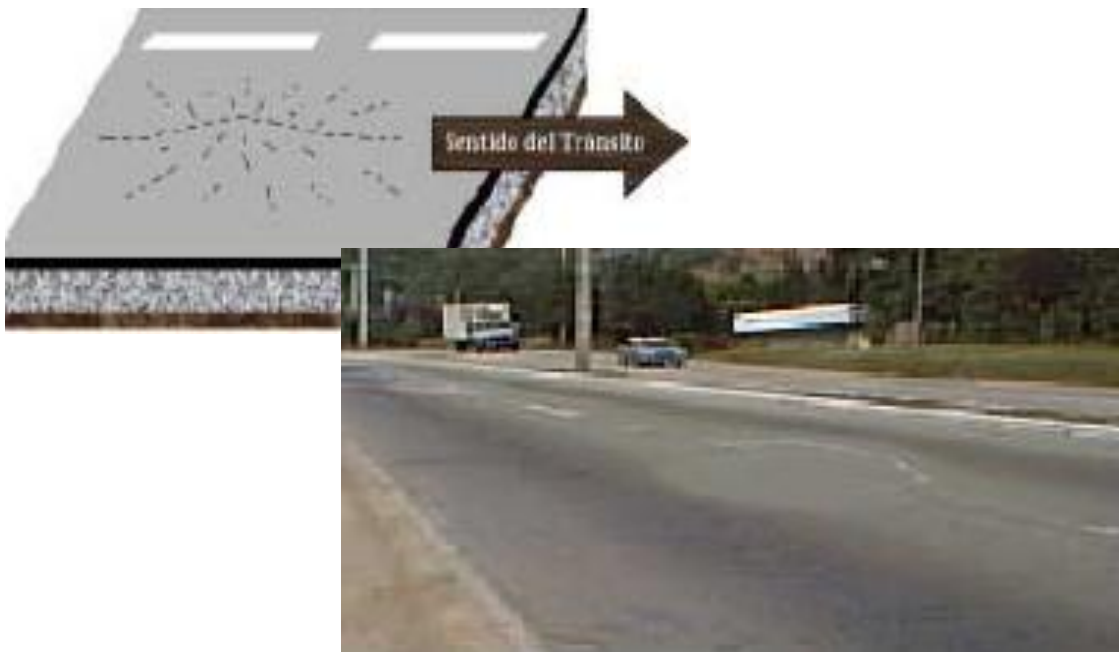
Niveles de severidad: Según su incidencia en la comodidad de manejo, se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) de acuerdo a la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible a la velocidad de operación promedio.

- **M (Mediano)** Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.
- **A (Alto)** Alta incidencia en la comodidad de manejo, condiciona la velocidad de circulación y produce una severa incomodidad con peligro para la circulación (el vehículo es proyectado por efecto del hinchamiento).

Medición: Los hinchamientos se miden en metros cuadrados de la superficie afectada, registrando separadamente, según su severidad, el área afectada en la muestra o sección.

Fig. 3.10 Daño por hinchamiento.



3.3.5 Hundimiento

Descripción: Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.

Posibles causas: Los hundimientos son causados por asentamientos de la fundación, deficiencias durante la construcción o falta de un continuo mantenimiento a los drenes. La heterogeneidad constructiva puede provocar, desde simples descensos de nivel, hasta insuficiencia de espesor o estabilidad de los materiales.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) de acuerdo a la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible a la velocidad de operación promedio.
- **M (Mediano)** Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.
- **A (Alto)** Alta incidencia en la comodidad de manejo, produce una severa incomodidad requiriéndose reducir la velocidad por razones de seguridad.

Medición: El hundimiento se mide en metros cuadrados, registrando separadamente, según su severidad, el área afectada en la muestra o sección.

Fig. 3.11 Daño por hundimiento.



3.4 DESINTEGRACIÓN DEL PAVIMENTO.

3.4.1 Bache

Descripción: Desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares.

Posibles causas: Los baches se producen por conjunción de varias causas: fundaciones y capas inferiores inestables; espesores insuficientes; defectos constructivos; retención de agua en zonas hundidas y/o fisuradas. La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento y/o fundación, o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo cuero de cocodrilo, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano, Alto) en función del área afectada y de la profundidad del bache, de acuerdo a la siguiente tabla:

Profundidad máxima (cm)	Diámetro Promedio del Bache (cm)		
	Menor a 70	70 - 100	Mayor a 100
Menor de 2.5	B	B	M
De 2.5 - 5.0	B	M	A
Mayor de 5.0	M	M	A

MEDICIÓN: Los baches descubiertos pueden medirse alternativamente: a) Contando el número de baches con niveles de severidad baja, moderada y alta, registrando estos separadamente, y b) Computando éstos en metros cuadrados de superficie afectada, registrando separadamente las áreas, según su nivel de severidad.

fig. 3.12 Bache con pérdida de material de base.



3.4.2 Peladura

Descripción: Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura del pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima.

Posibles causas: Esta anomalía es indicativa que el ligante se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligantes, o bien que la mezcla asfáltica

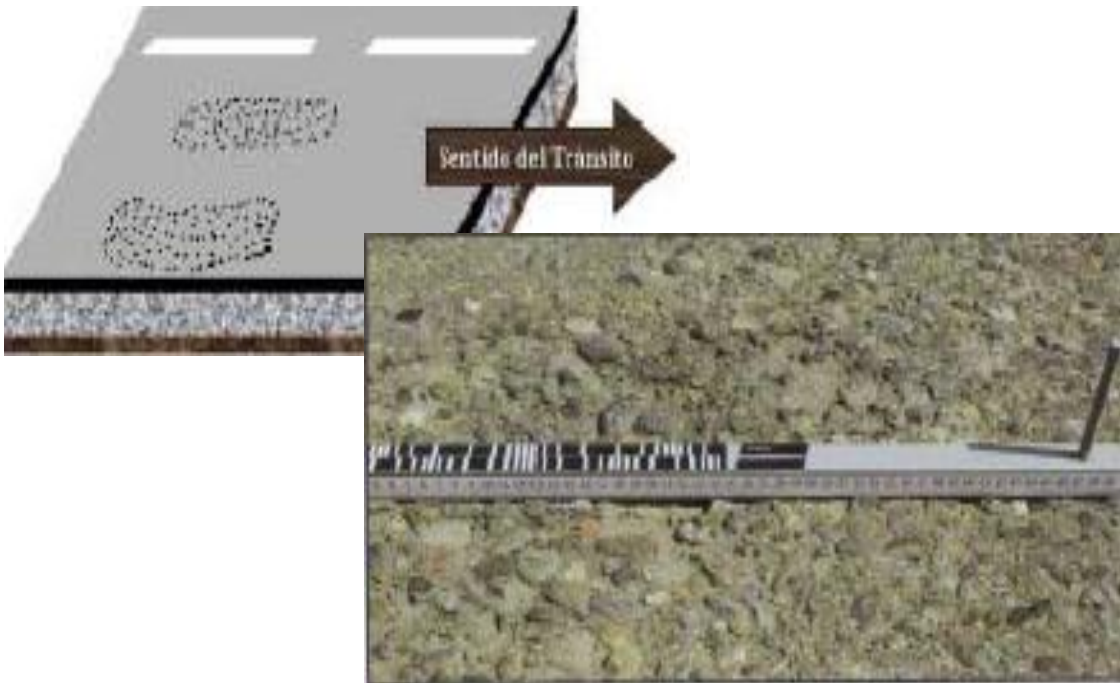
existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de ligante insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos; frecuentemente se presenta como un desprendimiento de agregados en forma de estrías longitudinales, paralelas a la dirección del riego. El desprendimiento puede ser originado también en un proceso de descubrimiento por pérdida de adherencia entre el agregado y el asfalto, cuando actúan agentes agresivos tales como solventes y otros derivados del petróleo, e inclusive, la acción del agua (pluvial).

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- ➔ **B (Bajo)** Pequeñas peladuras u oquedades superficiales, distribuidas erráticamente en la superficie del pavimento. El agregado y/o el ligante han comenzado a desprenderse en algunos sectores. En el caso de ataque por aceites, la superficie se ha ablandado y no puede penetrarse con una moneda.
- ➔ **M (Mediano)** Extensivos desprendimientos de agregados pétreos finos y/o de ligante, confieren a la superficie una textura abierta y rugosa. En el caso de ataque por aceites, la superficie se ha ablandado y puede penetrarse con una moneda.
- ➔ **A (Alto)** Extensivo desprendimiento de agregados pétreos gruesos y finos, confiere a la superficie una textura muy rugosa, con presencia de oquedades de máximo 10 y 15 mm de diámetro y profundidad respectivamente. En el caso de ataque por aceites, el asfalto ha perdido sus propiedades ligantes y el agregado ha quedado suelto.

Medición: Las peladuras se miden en metros cuadrados de superficie afectada, registrando éstas separadamente según el nivel de severidad identificado para cada caso.

Fig. 3.13 Daño por peladura.



3.4.3 Desintegración de bordes

Descripción: Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en las que existe una significativa porción de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

Posibles causas: La causa primaria es la acción localizada del tránsito, tanto por su efecto abrasivo como por el poder destructivo de las cargas, sobre el extremo del

pavimento donde la debilidad de la estructura es mayor debido al menor confinamiento lateral, deficiente compactación del borde, etc.

La presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, provocando peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con el estado del pavimento en los 0.50 m contiguos al mismo, según la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Se observan fisuras paralelas al borde, de severidad baja o moderada, sin signos de peladuras, desintegración y canales de erosión.
- **M (Mediano)** Se observan fisuras paralelas al borde, de severidad alta,* y/o peladuras de cualquier tipo, sin llegar a la rotura o desintegración total de los mismos.
- **A (Alto)** Se observa una considerable desintegración total de los bordes, con importantes sectores removidos por el tránsito; el borde resulta serpenteante, reduciendo el ancho de la calzada.

Medición: Las desintegraciones de bordes se miden en metros cuadrados, totalizados separadamente, de acuerdo a su severidad, las longitudes dañadas en la muestra o sección.

Fig. 3.14 Daño por desintegración de bordes con acumulación de agua.



3.5 OTROS DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS.

3.5.1 Exudación de asfalto

Descripción: Consiste en el afloramiento de un material bituminoso de la mezcla asfáltica a la superficie del pavimento, formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante el tiempo cálido.

Posibles causas: La exudación es causada por un excesivo contenido de asfalto en las mezclas asfálticas y/o sellos bituminosos.

Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficientes, durante épocas calurosas. El ligante dilata, llena los vacíos y aflora a la superficie, dejando una película de bitumen

en la superficie. Dado que el proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, el asfalto se acumula en la superficie.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- **B (Bajo)** Se hace visible la coloración algo brillante de la superficie, por efecto de pequeñas migraciones de asfalto, aún aisladas.
- **M (Mediano)** Apariencia característica, con exceso de asfalto libre que forma una película continua en las huellas de canalización del tránsito; la superficie se torna pegajosa a los zapatos y neumáticos de los vehículos en días cálidos.
- **A (Alto)** Presencia de una cantidad significativa de asfalto libre, le da a la superficie un aspecto "húmedo", de intensa coloración negra; superficie pegajosa o adhesiva a los zapatos y neumáticos de los vehículos en días cálidos.

Medición: La exudación del asfalto se mide en metros cuadrados de superficie afectada, registrando separadamente ésta según su severidad. Cuando se computa como "Exudación de Asfalto", dicha área no debe ser considerada como pulimiento de superficie.

Fig. 3.15 Pavimento dañado por exudación de asfalto.



3.5.2 Parchados y reparaciones de servicios públicos

Descripción: Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con material similar o diferente, para reparar el pavimento existente. También un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

Los parchados disminuyen el nivel de servicio de la carretera, al tiempo que puede constituir un indicador tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma. En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.

Posibles causas: Si bien los parches por reparaciones de servicios públicos se deben a causas diferentes, los niveles de severidad se definen en forma idéntica.

Niveles de severidad: Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Mediano y Alto) de acuerdo con la siguiente guía:

- **B (Bajo)** El parche se comporta satisfactoriamente, con muy poco o ningún deterioro.
- **M (Mediano)** El parche se encuentra moderadamente deteriorado; se evidencia un moderado deterioro alrededor de sus bordes.

- **A (Alto)** El parche está severamente dañado. La extensión o severidad de estos daños indican una condición de falla, siendo necesario el reemplazo del parche.

Medición: Los parchados se miden en metros cuadrados de área afectada, registrando separadamente éstas de acuerdo con su nivel de severidad. En un mismo parche (particularmente cuando éste alcanza cierta extensión) pueden diferenciarse áreas con distinto nivel de severidad. Si una gran extensión del pavimento ha sido reemplazada en forma continua (por ejemplo reconstruyendo toda una intersección), esta área no debe registrarse como parchado.

Fig. 3.16 Parche.



CAPITULO IV

CONSIDERACIONES

GENERALES,

ESPECIFICACIONES

TÉCNICAS Y MEZCLA

RECICLADA

4.0 CONSIDERACIONES GENERALES, ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y MEZCLA RECICLADA.

4.1 INTRODUCCION.

En este capítulo se presentan criterios dados por el Instituto del Asfalto en cuanto a la evaluación de los materiales recuperados y nuevos de los se disponen de poca información en nuestro país ya que las mas conocidas son las especificaciones SIECA y las FP'96 o las FP'03, las cuales no se han dejado de lado y se enfatiza en las secciones requeridas para el reciclaje en frío y en caliente.

Partiendo de las consideraciones generales previas a un proceso de rehabilitación de una carretera, como la extracción de muestras representativas teniendo como objetivo principal proporcionar los requerimientos para la evaluación de los materiales y para el diseño de la mezcla reciclada, así como las especificaciones utilizadas a materiales con fines de otros procesos de rehabilitación como las actividades de mantenimiento que juegan un papel importante en el reciclaje de pavimentos ya que a veces se requiere que los daños del pavimento deban ser reparados previo al reciclaje.

Los alcances de todas las especificaciones estándar son muy amplios y requieren ajustarse a cada proyecto en particular dependiendo de las condiciones que presente el pavimento a reciclar, por esta razón se debe tener cuidado para interpretar las especificaciones que se deben utilizar para lograr los objetivos que se proponen al construir o al reparar una vía. En el desarrollo de este capítulo se expondrá un resumen de estas especificaciones utilizadas en el tema de Reciclaje de pavimentos asfálticos para

así demostrar que aunque esta técnica es reciente en nuestro país se basa en normas ya existentes y utilizadas en la construcción de carreteras nuevas.

4.2 CONSIDERACIONES AMBIENTALES⁵

En el proceso de ejecución se deben tener en cuenta ciertas medidas de mitigación, prevención y protección del Medio Ambiente en lo que se refiere a:

- ✓ Sobre la disposición de material sobrante y desechos (botaderos).
- ✓ Sobre los campamentos.
- ✓ Sobre los sitios de préstamo
- ✓ Sobre la localización de la planta asfáltica y el transporte de asfalto

4.2.1 Disposición de material sobrante y desechos (Botaderos).

- Acumular o botar el material sobrante en sitios preestablecidos que no alteren el drenaje natural, ensucie o contaminen las aguas superficiales o afecten en alguna medida los cultivos en los terrenos aledaños. Igualmente los botaderos o acumulaciones de material sobrante no deben alterar el contorno estético del área.
- Los sitios botaderos deben indicarse en los documentos de licitación, o en su ausencia deben ser aprobados por el Supervisor antes de botar los desperdicios. El sitio para la disposición de los botaderos debe ser seleccionado cuidadosamente, evitando zonas inestables, área de importancia ambiental como humedades, pantanos o áreas de alta productividad agrícola.
- Deben evitarse y prohibirse que se den acumulaciones de desechos de maquinaria a

⁵ Extraído de las especificaciones SIECA

lo largo del derecho de vía.

- El manejo del drenaje es de suma importancia en el botadero para evitar su posterior erosión, por lo cual si se hace necesario, se colocarán filtros de desagüe para permitir el paso del agua.
- Cuando se rellenan laderas o depresiones, debe conformarse el relleno en forma de terrazas y colocar un muro de contención apropiado.
- Las laderas de los rellenos deben ser estabilizadas evitando la erosión y generación de sedimentos que contaminen las aguas superficiales cercanas.

4.2.2 Sobre los campamentos.

- La construcción de campamentos, si fuere necesario, debe ser en lugares previamente aprobados por el Supervisor fuera de zonas pobladas. El Contratista debe acatar las órdenes del Supervisor referente las medidas necesarias para evitar la contaminación del ambiente. Los campamentos deben contar con las instalaciones mínimas incluyendo pozo séptico para evitar la contaminación de las aguas subterráneas. El Contratista debe velar que los sobrantes de aceites de la maquinaria deben ser acumulados en recipientes seguros y adecuados para luego disponer de ellos. Los campamentos serán desmantelados al terminar la obra. Los residuos resultantes deben ser retirados y dispuestos adecuadamente.

4.2.3 Sitios de préstamo.

- Los sitios de préstamo y/o extracción de materiales de construcción sean de ladera, terraza, playones de ríos o quebradas, serán seleccionadas previo un análisis de

alternativas, y su explotación será sometida a aprobación del Supervisor.

- En los sitios de extracción o préstamo de material a lo largo de los cauces de los ríos, no se debe alterar el borde base ni la pendiente del cauce, como tampoco los represados o acumulaciones de material que alteren el alineamiento del cauce principal.
- No se dejarán cortes perpendiculares en los sitios de extracción de material o cantera ni permitir la existencia de hoyos en donde se acumule agua.
- En lo posible en los sitios de cantera debe nivelarse la topografía para que pueda adecuara a los terrenos aledaños.

4.2.4 La localización de la planta asfáltica y el transporte de asfalto.

- La planta debe localizarse en lugares desprovistos de vegetación, de fácil acceso y alejados de centros poblados. Las vías de entrada y salida de material estarán situadas en forma tal que los sobrantes, durante la carga y descarga, no afecten el área de los límites de las instalaciones.

4.3 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO⁶

Las actividades de mantenimiento desempeñan un papel muy importante, para mantener en muy buen estado las carreteras de nuestro país, pero el objetivo de hacer énfasis en ellas en el desarrollo de este capítulo, es que estas al ser ejecutadas correctamente se obtienen excelentes resultados en el pavimento, que es el fin que se persigue con la ejecución de estas actividades.

⁶ Las actividades de mantenimiento enfatizadas en la sección 4.3 y sus sub-secciones han sido extraídas de las especificaciones SIECA

Unicamente presentamos aquellas que específicamente tratan de reparar, mitigar los daños en el pavimento, que como se tipificaron en el capítulo anterior cada uno de ellos de acuerdo a su magnitud, pueden dar origen a lo que es el reciclaje del pavimento completo, si agregamos a estos daños el envejecimiento del pavimento.

Actividades de mantenimiento y su código de identificación según la SIECA.

CODIGO	NOMBRE
MR01	SELLO DE GRIETAS
MR01a	SELLO DE FISURAS
MR02	BACHEO SUPERFICIAL
MR 05	BACHEO PROFUNDO

4.3.1 Sello de grietas

Descripción. Este trabajo consistirá en la ejecución de las labores necesarias para el sellado de grietas de abertura superior a 3 mm aparecidas en la superficie del pavimento, mediante el sellado en caliente (asfaltos rebajados) o en frío (emulsiones), con un mástico asfáltico adecuado. Las grietas se producen a raíz de la eventual contracción de las capas inferiores del pavimento y se reflejan en la superficie de rodadura de la carretera.

Esta actividad no será ejecutada en aquellas áreas en que las grietas formen bloques interconectados de carácter poliédrico, semejante al agrietamiento piel de cocodrilo, cuya formación se debe en mayor parte a la fatiga del pavimento, debido a repeticiones de carga por exceso de peso en los ejes, en este caso se procederá a realizar un bacheo superficial o profundo en el área que determine el supervisor. Esta actividad no se aplica a fisuras con aberturas menores de 3 mm.

Dicho trabajo, se hará a lo largo de la línea de grieta a sellar, a fin de lograr la adecuada impermeabilización de la estructura en el sitio tratado.

Materiales. Los materiales para realizar esta actividad son: asfalto y arena fina.

Se usarán emulsiones o asfaltos rebajados. Emulsiones: CRS-2P (AASHTO M-316); CSS-1(AASHTO M 208) o CSS-1h (AASHTO M 208), asfalto rebajado MC-70 o MC-30 (AASHOTO M 82) u otro debidamente aprobado por el Supervisor.

La arena será la porción de agregado pétreo seco, de granulometría que pase el tamiz No. 4, La arena podrá ser triturada o natural, los granos serán densos, limpios y duros, libre de terrones de arcilla y de cualquier material que pueda impedir la adhesión de éstos con el asfalto.

Procedimiento de ejecución del trabajo: El Supervisor indicará la zona de grietas a sellar y el Contratista procederá inicialmente a la limpieza del área objeto de trabajo. Esta limpieza debe hacerse con mayor esmero y detalle a todo lo largo de la grieta por sellar, utilizando para ello aire a presión y cepillos especiales o cualquier otro instrumento que pudiese facilitar esta labor. Tanto el espacio de la grieta como el área adyacente a la misma, en un ancho no menor de 0.20 m debe estar libre de polvo, arcilla o de cualquier otro material, previo a continuar con la siguiente operación.

Una vez efectuada la limpieza, como se expuso anteriormente, se debe proceder a llenar el espacio agrietado con asfalto, utilizando para ello un recipiente de volumen fácilmente maniobrable que posea una boca de salida del tamaño y forma que permita derramar, en línea fina sobre la grieta, la emulsión o el asfalto con el cual la grieta debe ser rellenada. El asfalto debe ser calentado a la temperatura especificada conforme su tipo.

En caso de que la grieta a tratar fuese de abertura que no permitiese ejecutar con relativa facilidad las labores, ésta debe picarse en las orillas y debe desprenderse el material suelto, limpiando completamente el agujero longitudinalmente, el cual será rellenado con una mezcla, lo suficientemente fluida, de arena fina mezclada con asfalto.

Completadas las operaciones anteriores, debe esparcirse una delgada capa de arena fina sobre el área longitudinal de la grieta en proceso de sello, con el objeto de cubrir el asfalto derramado; Para formar una cáscara o costra que no permita desprendimiento o la pérdida del asfalto recién aplicado en la superficie, por adherencia a las ruedas del tránsito circulante. Finalmente debe limpiarse y barrerse todo material suelto, que como producto de las labores haya quedado en la superficie.

4.3.2 Sello de fisuras

Descripción. Este trabajo consistirá en la ejecución de las labores necesarias para el sellado de fisuras de abertura menores a 3 mm aparecidos en la superficie del pavimento, mediante el sellado en frío o en caliente, con un mástic asfáltico adecuado. Las fisuras se producen a raíz de la eventual contracción de las capas inferiores del pavimento y se reflejan en la superficie de rodadura de la carretera.

Esta actividad no será ejecutada en aquellas áreas en que las fisuras formen bloques interconectados de carácter poliédrico, semejante al agrietamiento piel de cocodrilo, cuya formación se debe en mayor parte a la fatiga del pavimento, debido a repeticiones de carga por exceso de peso en los ejes, en tales casos se procederá a realizar bacheo superficial o profundo en el área que indique el supervisor.

Dicho trabajo, se hará a lo largo de la línea de fisura a sellar, a fin de lograr la adecuada impermeabilización de la estructura en el sitio tratado.

Materiales. Los materiales para realizar esta actividad son: asfalto y arena fina.

Se usarán emulsiones o asfaltos rebajados. Emulsión: CRS - 2P (AASHTO M 316) CSS -1 (AASHTO M 208), emulsión CSS - 1h (AASHTO M 208), asfalto rebajado MC-70 o MC-30 que reúnan las características especificadas en AASHTO M 82 u otro debidamente aprobado por el Supervisor.

La arena será la porción de agregado pétreo seco, de granulometría que pase el tamiz No. 4, La arena podrá ser triturada o natural, los granos serán densos, limpios y duros, libre de terrones de arcilla y de cualquier material que pueda impedir la adhesión de éstos con el asfalto.

Procedimiento de ejecución del trabajo: El Supervisor indicará la zona de fisuras a sellar y el Contratista procederá inicialmente a la limpieza del área objeto de trabajo. Esta limpieza debe hacerse con mayor esmero y detalle a todo lo largo de la grieta por sellar, utilizando para ello aire a presión y cepillos especiales o cualquier otro instrumento que pudiese facilitar esta labor. Tanto el espacio de la fisura como el área adyacente a la misma, en un ancho no menor de 0.20 m debe estar libre de polvo, arcilla o de cualquier otro material, previo a continuar con la siguiente operación.

Una vez efectuada la limpieza, como se expuso anteriormente, se debe proceder a llenar el espacio agrietado con asfalto, utilizando para ello un recipiente de volumen fácilmente maniobrable que posea una boca de salida del tamaño y forma que permita derramar, en

línea fina sobre la grieta, el asfalto con el cual la grieta debe ser rellenada. El asfalto debe ser calentado a la temperatura especificada conforme su tipo.

En caso de que la fisura a tratar fuese de abertura que no permitiese ejecutar con relativa facilidad las labores, ésta debe picarse en las orillas y debe desprenderse el material suelto, limpiando completamente el agujero longitudinalmente, el cual será rellenado con una mezcla, lo suficientemente fluida, de arena fina mezclada con asfalto.

Completadas las operaciones anteriores, debe esparcirse una delgada capa de arena fina sobre el área longitudinal de la fisura en proceso de sello, con el objeto de cubrir el asfalto derramado; para formar una cáscara o costra que no permita desprendimiento o la pérdida del asfalto recién aplicado en la superficie, por adherencia a las ruedas del tránsito circulante. Finalmente debe limpiarse y barrerse todo material suelto, que como producto de las labores haya quedado en la superficie.

4.3.3 Bacheo superficial

Descripción: Consiste en reconstruir localmente la capa de rodadura en los pequeños deterioros que empiezan a formarse cuya degradación puntual así lo requiera (deformaciones, agrietamientos, baches), y en general todos aquellos deterioros locales cuya evolución posterior pueda afectar a la seguridad de la circulación y comodidad del usuario. También se llevará a cabo si se ha realizado con anterioridad alguna actividad provisional en las capas superficiales, como en el caso de ahuellamientos o bacheo provisional. En el caso del bacheo superficial sólo se restituirá la capa de rodadura hasta la capa superior del material de base.

Materiales: Se utilizará concreto asfáltico en caliente elaborada en planta. El método de dosificación y control del concreto asfáltico, será el Método Marshall (AASHTO T-45). No se permitirá la segregación del concreto asfáltico durante la operación de transporte del mismo.

Para la capa de liga se utilizará un asfalto rebajado tipo RC-70 (AASHTO M-81) o emulsiones asfálticas CSS-1 (AASHTO M-208) o CSS-1h (AASHTO M-208). Si se utiliza RC-70, éste se aplicará en proporción de 1.0 litro/mt² y en el caso de utilizar emulsiones asfálticas la proporción será de 0.7 lt/mt².

Salvo casos especiales, debidamente justificados, podrá utilizarse mezclas asfálticas fabricadas en frío utilizando emulsión asfáltica. En este caso, el contratista debe utilizar un equipo de mezclado adecuado para tal fin y tanto la mezcla a utilizar como el proceso de fabricación deberá ser previamente autorizado por el Supervisor.

Procedimiento de ejecución del trabajo: El supervisor marcará sobre el pavimento las áreas a reparar y posteriormente, el contratista deberá colocar todos los dispositivos de señalización y seguridad y proceder a cortar el pavimento en formas rectangulares o cuadradas de lados paralelos y perpendiculares al eje de la carretera, de forma que exceda en unos 20 centímetros en cada dimensión de la superficie a reparar.

Se cortará verticalmente con sierra mecánica el pavimento hasta alcanzar una profundidad máxima de 8 cms o alcanzar el límite inferior de la capa asfáltica.

Se retirará la mezcla asfáltica afectada, acumulándola y desalojándola a los botaderos autorizados.

Se barrerá y limpiará con aire a presión el fondo y paredes de la excavación realizadas para eliminar las partículas sueltas y el polvo.

Se deberá aplicar un riego de liga a la superficie ya limpia y se colocará la mezcla asfáltica en todo el espesor necesario a las dimensiones del bache.

La compactación debe hacerse, iniciándola desde la parte exterior del área tratada hacia el interior de la misma.

El área reparada, debe estar al mismo nivel de la superficie de rodadura adyacente, es decir, no debe permitirse que el área tratada manifieste depresiones o abultamientos. Al terminar el proceso, la carretera debe mantener su sección transversal de diseño.

No se permitirá la colocación de concreto o mezcla asfáltica bajo lluvia.

Por ningún motivo puede dejarse un bache abierto para colocar el concreto o mezcla asfáltica al día siguiente.

4.3.4 Bacheo profundo

Descripción: En las zonas inestables bajo la estructura del pavimento de una carretera, independientemente que la inestabilidad sea producida por problemas de la capa de rodadura, por saturación del suelo circundante, bolsón del suelo inestable, fatiga de la estructura del pavimento o por contaminación de cualquier naturaleza, las áreas con problemas de este tipo deben ser preparadas con el objeto de devolver la sustentación estructural original de la carretera y para proporcionar el confort y la seguridad esperada del mismo.

Por lo general, el bacheo profundo implica reponer la carpeta asfáltica en su totalidad (espesor promedio de 8 cms) y la base existente (promedio 20 cms). En algunos casos,

podría implicar trabajos de excavaciones por debajo de la base existente y restituir con material no clasificado.

Materiales: Se utilizará concreto asfáltico en caliente elaborado en planta. El método de dosificación y control del concreto asfáltico, será el Método Marshall (AASHTO T-245). No se permitirá la segregación del concreto asfáltico durante la operación de transporte del mismo.

Salvo casos especiales, debidamente justificados, podrá utilizarse mezclas asfálticas fabricadas en frío utilizando emulsión asfáltica. En este caso, el contratista debe utilizar un equipo de mezclado adecuado para tal fin y tanto la mezcla a utilizar como el proceso de fabricación deberá ser previamente autorizado por el Supervisor.

Para la capa de liga se utilizará un asfalto rebajado tipo RC-70 (AASHTO M-81) o emulsiones asfálticas CSS-1 (AASHTO M-208) o CSS-1h (AASHTO M-208). La proporción será de 1.0 lt/mt² si se utiliza asfalto rebajado y 0.7 lt/mt² en emulsión.

Salvo casos especiales, debidamente justificados, podrá utilizarse mezclas asfálticas fabricadas en frío utilizando emulsión asfáltica. En este caso, el contratista debe utilizar un equipo de mezclado adecuado para tal fin y tanto la mezcla a utilizar como el proceso de fabricación deberá ser previamente autorizado por el Supervisor.

La base a utilizar podrá ser del tipo granular o una base estabilizada. De utilizar base granular el agregado se compondrá de materiales pétreos triturados con un tamaño máximo de 1 pulgada y por lo menos el 50% del material debe ser retenido en el tamiz No. 4. El índice de plasticidad no debe ser mayor de 6 (AASHTO T-90), el límite

líquido no mayor de 25 (AASHTO T-89), el valor de soporte, CBR, no debe ser menor de 80 (AASHTO T-193) y el desgaste al ser sometido al ensayo de abrasión en la máquina de los Ángeles (AASHTO T-96) debe presentar un desgaste menor del 40%. En el caso de bases estabilizadas, el contratista propondrá al supervisor todas las especificaciones de los productos a utilizar, sus proporciones y las características de los mismos para su respectiva aprobación.

Procedimiento de ejecución del trabajo: Al igual que para el bacheo superficial, el supervisor marcará sobre el pavimento las áreas a reparar y posteriormente, el contratista deberá colocar todos los dispositivos de señalización y seguridad y proceder a cortar el pavimento en formas rectangulares o cuadradas de lados paralelos y perpendiculares al eje de la carretera, de forma que exceda en unos 20 centímetros en cada dimensión de la superficie a reparar.

Se cortará verticalmente con sierra mecánica el pavimento hasta alcanzar una profundidad promedio de 20 cms o alcanzar el límite inferior de la capa de base o hasta el nivel que indique el supervisor. En algunos casos y cuando el supervisor lo indique, se profundizará más para remover cualquier material o capa inferior defectuosa o inestable, la cual deberá ser rellenada con material no clasificado y debidamente aprobado por el supervisor, pero deberán cumplir con un índice de plasticidad no mayor de 8, límite líquido no mayor de 30 y el CBR debe ser mayor de 10.

Se retirará la mezcla asfáltica afectada y el material de base, acumulándola y desalojándola a los botaderos autorizados.

Se barrerá y limpiará con aire a presión el fondo y paredes de la excavación realizadas para eliminar las partículas sueltas y el polvo.

Se procederá a colocar y compactar el material de relleno (si fuera necesario) en capas de espesor acorde con el equipo de compactación disponible y debe alcanzar por lo menos el 95% de la densidad máxima seca, medida a través del ensayo Proctor Estándar (AASHTO T-99). En ningún caso se colocará este tipo de material más arriba del nivel inferior de la subbase o base existente. El material deberá tener el grado de humedad necesario para alcanzar la compactación requerida.

El material de base debe ser colocado y extendido en capas de espesor similar y en el proceso de mezclado no debe permitirse la segregación del mismo. El proceso de compactación debe ejecutarse utilizando el equipo que asegure obtener el 95% de la densidad, medido a través del procedimiento Proctor modificado (AASHTO T-180). En las zonas inaccesibles para el equipo utilizado en la compactación, deben ser compactadas satisfactoriamente mediante el uso de compactadores vibratorios manuales, previamente aprobados por el supervisor. Los daños que el equipo del contratista cause en este proceso a la zona adyacente al trabajo, serán reparados por su cuenta.

Una vez terminado el proceso de colocación de la capa de base, se deberá aplicar un riego de liga o imprimación a la superficie ya limpia y se colocará la mezcla asfáltica en todo el espesor necesario a las dimensiones del bache.

La compactación debe hacerse, iniciándola desde la parte exterior del área tratada hacia el interior de la misma.

El área reparada, debe estar al mismo nivel de la superficie de rodadura adyacente, es

decir, no debe permitirse que el área tratada manifieste depresiones o abultamientos. Al terminar el proceso, la carretera debe mantener su sección transversal de diseño.

No se permitirá la colocación de concreto o mezcla asfáltica bajo lluvia.

Por ningún motivo puede dejarse un bache abierto para colocar el concreto o mezcla asfáltica al día siguiente.

4.4 RECICLADO DE PAVIMENTOS

Las especificaciones técnicas utilizadas, para el reciclaje de un pavimento sea este en frío o en caliente, son directamente aplicadas a los materiales utilizados en el proceso, bajo el concepto de que estos materiales son procedentes de muestras representativas del pavimento a reciclar, los cuales deben estar regidas por las normas utilizadas en nuestro país para este proceso, como lo son las FP'96, FP'03 o las SIECA.

Estos materiales procedentes de la mezcla asfáltica de la carpeta asfáltica y demás agregados de la base y sub-base del pavimento existente son sometidos a ensayos y bajo los parámetros especificados se determina la **mezcla reciclada** y demás cantidades y calidades de **materiales nuevos** a agregar a los existentes para conformar lo que será el pavimento reciclado.

4.4.1 Evaluación de materiales para la mezcla en frío (Traducción Libre)⁷

Este capítulo cubre los procedimientos para la muestra y prueba de materiales para la mezcla fría reciclada. Incluyendo las consideraciones de selección de materiales nuevos.

⁷ Extraído de ASPHALT COLD-MIX RECYCLING
Autor: THE ASPHALT INSTITUTE, manual series No 21 (MS-21), March 1983

4.4.1.1 Muestra de campo.

Esta debe ser muestra representativa de pavimento existente, esto es requerido para un buen análisis y la necesidad de lograr una mezcla satisfactoria. El método muestreo especificado por la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales estándar, ASTM D 979 *muestra bituminosa de mezcla de pavimento*, debería ser la siguiente. En adición el espesor del pavimento debe ser indicado. Se debe dar una inspección visual de la carretera y una revisión de la construcción y registro de mantenimiento, debería ser hecha para descubrir alguna variación significativa en los materiales a ser reciclados. La sección de carretera con diferencias significativas en la composición de los materiales debe ser evaluada como unidad separada.

La localización de muestras debe ser seleccionada de acuerdo a los criterios técnicos. Un mínimo de cinco muestras por kilómetro (uno por bloque en la ciudad) deben ser tomados para análisis en el laboratorio. Si los materiales de la base deben ser reciclados en el lugar, se deben sacar muestras de ellos en la misma posición y el registro del espesor de la capa. (Esto debe ser anotado para tener la graduación del agregado en una mezcla específica ya que puede ser alterado por el tipo de proceso usado de recuperación, sea este el fresado en frío, el triturado o similar).

4.4.1.2 Pavimento asfáltico recuperado. (RAP)

El diseño apropiado de una mezcla para reciclaje de mezclas en frío, es que los agregados y el contenido de asfalto en el pavimento asfáltico recuperado deben ser evaluados independientemente. Es por lo tanto necesario separar el contenido de asfalto

de los agregados en una muestra representativa de pavimento asfáltico recuperado. El asfalto es extraído acorde a la norma ASTM D 2172, *extracción cuantitativa de bitumen de una mezcla de pavimento bituminoso*. (En mezcla que contienen asfaltos rebajados o asfaltos emulsificados que contienen solventes, una determinación de “asfalto residual” puede ser obtenido calentando la muestra antes extraída por sobre tres horas a 121 °C ó 250 °F).

Las siguientes propiedades son entonces determinadas:

- a) Gradación de agregados – la gradación de los agregados una vez separado del asfalto es establecida por el análisis del tamiz, ASTM C 136 *Análisis de tamizados de agregados finos y gruesos*.
- b) Contenido de asfalto – El contenido de asfalto de un pavimento asfáltico recuperado es determinado en base al peso relativo del asfalto extraído y los agregados.

4.4.1.3 Agregado material recuperado. (RAM)

La graduación de material agregado recuperado para una muestra representativa es determinada por el uso del método, ASTM C 136.

La cantidad del material agregado recuperado (materiales extraídos en el lugar) depende de factores tales como la forma de la partícula de agregado, tipo y cantidad de finos y diferencias en absorción. Existen bases granulares y caminos sin superficies sin tratar, que incluyen una amplia variedad de agregados y combinaciones suelo-agregado. Aunque materiales que van de arenas limosas a bien graduadas, rocas trituradas pueden ser recicladas por el proceso de mezcla-fría, pero hay ciertos criterios deben ser reunidos para garantizar el éxito.

Existen (en el lugar) agregados para reciclado en frío que debe reunir uno (no ambos) de los siguientes criterios:

- 1) Una medida de la conveniencia de material fino o suelto para reciclaje de mezclas para reciclaje en frío es el resultado del índice de plasticidad, ASTM D 424, *limite plástico e índice de plasticidad de los suelos, y el porcentaje que pasa el tamiz de 75 μm (N° 200) debe ser menor a 72.*
- 2) Otra medida de conveniencia es la prueba del equivalente de arena. ASTM D 2419, *valor equivalente de arena, de suelos y agregados finos*, es usado para detectar excesiva cantidad de arcillas, finos plásticos y polvo. Generalmente, los materiales con un equivalente de arena sobre 30 puede ser reciclada con éxito. La posibilidad de tener éxito con materiales que tienen un equivalente de arena de 20 a 30 depende en la habilidad del asfalto de impermeabilizar las partículas. Procurar estabilizar suelos granulados con equivalentes de arena menores a 20 no son normalmente exitoso.

La habilidad del material agregado recuperado a resistir despojos puede ser indicado por pruebas. El grado de prueba de despojos de la partícula, *cubriendo y despojando a mezclas de agregados-bitumen*, ASTM D 1664, puede ser usada para este propósito.

4.4.1.4 Nuevos agregados.

Si un nuevo agregado es necesario para corregir la graduación del material agregado recuperado (RAM) o el incremento del espesor al pavimento a reciclar, su calidad no debe ser menor a la del material agregado recuperado del subtema anterior.

La gradación del nuevo agregado, basado en el diseño de la mezcla requerida, es establecido por un análisis de tamices; ver ASTM C 136.

Para la calidad de los agregados en todas sus propiedades, deberán ser conforme a los parámetros establecidos en la sección 703 de las especificaciones SIECA.

4.4.2 Agentes estabilizadores⁸

Actualmente, se usa un amplio rango de agentes estabilizadores en el mundo; éstos incluyen compuestos químicos, tales como cloruro de calcio, polímeros de cadena larga y productos sulfatados del petróleo, al igual que otros productos patentados y agentes más convencionales como el cemento. Todos persiguen el mismo objetivo; ligar las partículas individuales para incrementar la resistencia o hacer el material más resistente al agua. Algunos agentes son más efectivos sobre materiales específicos y otros tienen claras ventajas económicas, pero todos cuentan con un lugar en el mercado; además, la mayor parte de ellos ofrece mejores resultados cuando se usan con máquinas recicladoras modernas.

Continuamente se están desarrollando nuevos productos siendo importante para la industria contar con una buena experimentación. Siempre debe promoverse la innovación, ya que no puede pretenderse que un solo agente estabilizador sea el mejor para todas las aplicaciones. Los ingenieros tienen que mantener su mente abierta cuando se enfrentan a la toma de decisión de cuál agente usar en un proyecto específico. Tales decisiones invariablemente están influidas en orden de importancia, por los siguientes factores:

⁸ Basado en el manual de reciclaje en frío Wirgent, segunda edición Septiembre 2001.

- **Precio.** El costo unitario del estabilizador (expresado normalmente en pesos por metro cuadrado de capa terminada) siempre será la preocupación principal.
- **Disponibilidad.** En varias partes del mundo no se consigue un agente estabilizador específico. Las emulsiones asfálticas son un ejemplo, ya que actualmente no se fabrican en ciertos países.
- **Características del material.** Algunos agentes estabilizadores son más efectivos que otros sobre cierto tipo de materiales. Por ejemplo, se prefiere la cal en lugar del cemento cuando van a estabilizarse suelos de alta plasticidad.
- **Política.** Algunos propietarios de carreteras, a menudo influenciados por experiencias anteriores, tienen políticas rígidas en relación con el uso de ciertos tipos de agentes estabilizadores.

4.4.2.1 Agentes estabilizadores cementantes.

La cal, el cemento y la mezcla de estos productos con cenizas volantes, escorias de alto horno y otros materiales, corresponden a los agentes estabilizadores cementantes comúnmente usados.

La principal función de estos agentes es incrementar la resistencia, además de la cal liberada durante el proceso de hidratación reacciona con los minerales arcillosos presentes en los suelos, reduciendo su plasticidad. El uso del cemento debe limitarse al tratamiento de materiales que presenten un índice de plasticidad menor que 10. La cal es el mejor agente estabilizador para materiales de mayor plasticidad.

La resistencia alcanzada depende en gran parte de la cantidad de agente estabilizador que se incorpore, pero también del tipo de material que va a tratarse. Contrario al punto de vista de algunos expertos, la adición de una mayor cantidad de agente estabilizador para lograr una mayor resistencia puede ir en detrimento del comportamiento de la capa. Un material tratado con agentes cementantes tiende a ser semifrágil, y al incrementar la resistencia se hace más frágil, con una consecuente disminución de las propiedades de fatiga de la capa estabilizada. Lo anterior conduce, invariablemente, a una proliferación de grietas indeseables por efecto de las cargas repetidas del tráfico. Resulta por tanto importante que los requerimientos de comportamiento de la capa tratada no sean ambiguos y que se realice un diseño apropiado de la mezcla sobre muestras representativas con el objeto de determinar la dosificación correcta.

4.4.2.1.1 Estabilización con cemento.

El cemento corresponde al agente estabilizador más usado. Su empleo excede en gran medida a los demás agentes estabilizadores combinados, debido principalmente a su disponibilidad, pues el cemento se manufactura en muchos países y está disponible alrededor del mundo. Otra razón radica en su aceptación como material de construcción. Existen diferentes estándares, métodos de ensayo y especificaciones disponibles para los tratamientos con cemento, así como numerosos ejemplos de pavimentos con capas estabilizadas con cemento de buen comportamiento.

No obstante, a estabilización con cemento requiere una atención especial, ya que todos los materiales tratados con cemento, incluyendo el concreto, son propensos al

agrietamiento. Sin embargo esto puede controlarse y no necesariamente es perjudicial, como se explica en la siguiente sección.

4.4.2.1.1 Agrietamiento del material tratado con cemento.

Es importante reconocer que los materiales tratados con cemento tienden a agrietarse por dos razones muy diferentes: la primera es por la reacción química que tiene lugar cuando el cemento se hidrata en presencia de agua y por tanto no es inducida por el tráfico, y la segunda se debe a las cargas repetitivas del tráfico. En cada caso, la iniciación de las grietas y su subsecuente propagación son bastante diferentes, por lo cual se comentarán por separado.

Grietas no originadas por el tráfico.

Cuando un material es tratado con cemento resulta inevitable la formación de grietas, pues a medida que el cemento se hidrata, se forman complejos cristales de silicato de calcio que ligan las partículas del material. Adicionalmente a la generación de calor y a otros numerosos cambios que se producen durante esta reacción química, el material experimenta un cambio de volumen y se contrae, dando lugar a las grietas por contracción. Estas grietas son inevitables y constituyen uno de los riesgos de trabajar con cemento. La intensidad (separación entre grietas) y la magnitud (ancho de la grieta), o el grado de agrietamiento, están influidos en gran medida por:

- **El contenido de cemento.** La contracción que ocurre durante la hidratación es función de la cantidad de cemento presente. A medida que se incrementa el contenido de cemento aumenta el grado de agrietamiento, siendo esta una de las

principales razones para minimizar su incorporación y cumplir con las exigencias del diseño. La adición de muy bajos contenidos de cemento ($< 2\%$ en masa) solamente debe considerarse si éste se inyecta en el proceso de reciclaje en forma de lechada.

- **El tipo de material por estabilizar.** Algunos materiales tienden a contraerse más que otros cuando se tratan con cemento. Adicionalmente, ciertos materiales plásticos son más activos, y presentan cambios significativos de volumen entre los estados húmedo y seco. Cuando el IP (Índice de Plasticidad) de material es mayor que 10, debe adicionarse cal o una combinación de cal y cemento para producir la plasticidad, ojala hasta un estado no plástico.

- **El contenido de humedad en la compactación.** El grado de agrietamiento es función de la cantidad de humedad que se pierde a medida que el material se seca. Éste puede reducirse significativamente, limitando el contenido de humedad en el momento de la compactación a menos del 75 % de la humedad de saturación.

- **La velocidad de secado.** Cuando el material tratado con cemento se contrae, se inducen esfuerzos internos en el mismo. El grado de agrietamiento es altamente dependiente de la relación entre las velocidades con que se desarrollan la resistencia y los esfuerzos de contracción. Si el material se seca con rapidez, los esfuerzos generados por la contracción superarán la resistencia desarrollada, en tanto que el patrón de grietas será más intenso (2 m x 2 m) y las grietas angostas. Cuando el secado es lento se observará un patrón de menor intensidad (6 m x 4 m),

con grietas anchas. Un curado apropiado de la capa terminada prevendrá el secado de la superficie, reduciendo la intensidad y la magnitud del agrietamiento.

Las grietas por contracción son más anchas en la superficie que en la base (el secado se inicia en la superficie) y sus paredes son irregulares, permitiendo una transferencia efectiva de las cargas del tráfico debido a la trabazón mecánica que se presenta entre las caras de la grieta.

Grietas causadas por el tráfico.

Este tipo de grietas se presenta cuando el material tratado con cemento se encuentra sobreesforzado o se ha excedido su vida de fatiga. Las grietas comienzan en la base de la capa, donde los esfuerzos de tensión inducidos por las cargas del tráfico son máximos y, a su vez, generan las máximas deformaciones. Las capas tratadas con cemento son semifrágiles y exhiben propiedades elásticas relativamente pobres y, por ende, sensibles a las sobrecargas.

Las grietas por fatiga ocurren después de un número predecible de repeticiones de carga. Esta clase de grietas no implica una falla inminente. Luego del agrietamiento inicial, la capa todavía es capaz de soportar las cargas del tráfico y en este estado la capa puede modelarse reduciendo el valor de su módulo. La intensidad y la magnitud de las grietas se incrementan a medida que la capa se deteriora con las cargas de tráfico posteriores. Esta reducción en el módulo continúa hasta que finalmente el material regresa a la condición granular anterior a su estabilización.

4.4.2.1.1.2 Criterios para las capas estabilizadas con cemento

Las propiedades más importantes aplicables a los materiales tratados con cemento son:

- **Resistencia.** El ensayo comúnmente usado para evaluar los materiales cementados es el UCS ya que el ensayo de CBR no se considera lo bastante sensible para evaluar materiales de alta resistencia. El ensayo UCS normalmente se realiza sobre muestras preparadas que han sido curadas durante siete días a una temperatura de 22°C y una humedad superior al 95 %. Algunos métodos de ensayo permiten que se acelere el curado poniendo las probetas en horno a 75°C durante 24 horas.

El contenido de cemento que dé lugar a valores de la UCS entre 1,5 y 3 MPa normalmente se considera como el óptimo para el material reciclado. Generalmente se requieren las siguientes dosificaciones de cemento, expresadas como un porcentaje de la masa del material reciclado:

- Material fresado / piedra triturada (mezcla 50/50) - 2,0 a 2,5%
- Piedra triturada - 2,0 a 3,0 %
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 3,0 a 4,0 %

- **Tiempo de procesamiento.** El mezclado, colocación, compactación y terminado deben llevarse a cabo en el menor tiempo posible. Para los materiales tratados con cemento, normalmente se especifica un tiempo límite de una hora, medido desde el primer momento en que el cemento entra en contacto con el material hasta cuando se termina la compactación. Con el uso de equipos modernos de reciclaje, es posible reducir este tiempo a menos de una hora.

- **Densidad.** Para cada sitio de ensayo normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 97 % de la densidad AASHTO modificada. Algunas veces se permite una variación de densidad, precisando una densidad promedio, lo que significa que la densidad en la parte superior de la capa puede ser mayor que la de la base. Donde se especifique, también es normal incluir una desviación máxima del 2 % para la densidad medida en el tercio inferior de la capa. Así, si la densidad promedio fijada es del 97 %, entonces la densidad en la base de la capa debe ser mayor del 95 %.

4.4.2.2 Agentes estabilizadores bituminosos

El uso del asfalto como agente estabilizador, aplicado en forma de emulsión o de espuma, es cada vez más popular gracias a los avances tecnológicos. Para la estabilización de capas delgadas se han aplicado de manera exitosa algunos asfaltos líquidos, pero las tendencias actuales en la protección ambiental los hacen poco populares hoy en día.

Los materiales estabilizados con asfaltos no sufren el fenómeno de agrietamiento por contracción asociado a los tratamientos con cemento y pueden abrirse al tráfico inmediatamente debido a la liga inicial (resistencia) que se presenta entre partículas de la superficie, lo que previene el descascaramiento con la acción del tráfico. Sí la superficie se encuentra correctamente terminada, la apertura temprana al tráfico rara vez afectará de manera negativa el material estabilizado. Como mínimo durante la primera semana, mientras el material gana resistencia, no deben estacionarse vehículos pesados sobre la capa tratada, entre ellos equipos de compactación.

El tratamiento con asfalto es una manera económica de mejorar la resistencia de un material y reducir el efecto del agua. Comparados con los agentes estabilizadores cementantes, los materiales ligados con asfalto producen una capa flexible con propiedades superiores a la fatiga, permitiendo reducir así el espesor de la capa sin sacrificar la capacidad estructural del pavimento.

Existen dos tipos de procesos de reciclaje, muy diferentes, que utilizan asfalto:

- Reciclaje exclusivo de carpetas asfálticas delgadas. En este proceso la emulsión asfáltica se utiliza con el objeto de rejuvenecer el asfalto envejecido del pavimento existente. Esencialmente corresponde a un proceso in situ de mezclas en frío y no a un proceso de estabilización.
- Un proceso de estabilización en el cual el asfalto se usa para estabilizar el material reciclado. Normalmente este proceso es aplicable cuando el espesor de la capa es mayor que 100 mm.

Es importante entender que el reciclaje profundo con agentes estabilizadores bituminosos da lugar a un material estabilizado que no se parece a una mezcla asfáltica. Las bases asfálticas de gradación continua presentan por lo general un contenido de vacíos de aproximadamente 4 %. A diferencia de las mezclas manufacturadas, la gradación que se obtiene de un material reciclado depende en gran medida del tipo de material presente en la estructura del pavimento. Por lo regular, los materiales estabilizados con asfalto tienen un contenido de vacíos que oscila entre 10 y 20 % y tienden a comportarse en parte como un material granular, capaz de soportar los esfuerzos por la fricción entre partículas, y en parte también como un material

viscoelástico que puede soportar esfuerzos de tensión repetitivos. Por tanto, son híbridos. Algunos materiales marginales tratados con agentes estabilizadores bituminosos presentan bajas propiedades de resistencia conservada (pierden resistencia cuando se sumergen en agua), pero dicha característica puede superarse mediante la adición de cemento. Pequeñas cantidades de cemento o de cal (0,5 a 2 % en masa) pueden incrementar de manera significativa la resistencia conservada, sin afectar las propiedades de fatiga de la capa. Por tanto, generalmente se usa cemento o cal con agentes estabilizadores bituminosos, excepto cuando sólo se recicla material fresado.

4.4.2.2.1 Estabilización con emulsión asfáltica.

Originalmente las emulsiones asfálticas se desarrollaron como un medio para superar las dificultades que se presentan al trabajar con cementos asfálticos calientes, en particular para la estabilización y para el mezclado, a temperatura ambiente, con materiales humedecidos.

Una emulsión está constituida por dos líquidos no miscibles, uno disperso en el otro en forma de pequeños glóbulos o gotas. En las emulsiones asfálticas convencionales, el asfalto se encuentra disperso en una fase continua que es el agua. Mediante agentes de superficie activa (emulsificantes) se previene que las partículas de asfalto se junten nuevamente, al formar una película protectora alrededor de las mismas. Muchas de las emulsiones usadas como agentes estabilizadores tienen un contenido de "asfalto residual" del 60 %, lo que significa que el 60 % del volumen de la emulsión es asfalto disperso en un 40 % de volumen de agua.

Después de mezclarse con el material, el agua se pierde y las partículas de asfalto se juntan otra vez en una película continua depositada sobre la superficie de los agregados.

Este proceso, conocido como "rotura", se ve afectado por:

- Pérdida de agua por evaporación o absorción en el material con que se está mezclando.
- Coagulación química debida a la reacción que ocurre entre la emulsión y el agregado.
- Alteración mecánica causada por presiones de bombeo excesivas, por la acción de mezclado y por los esfuerzos de compactación.
- Composición química de la emulsión.

Normalmente se usa cemento junto con la emulsión asfáltica, puesto que este no sólo mejora la resistencia conservada, sino que también actúa como un catalizador, incrementando las propiedades de resistencia a corto plazo y facilitando de esta manera la acomodación del tráfico. Investigaciones realizadas sobre el efecto de la combinación de cemento con emulsión asfáltica han demostrado que no hay una reducción significativa de las características las características de fatiga de la capa estabilizada al incorporarle hasta un 2% en masa de cemento. Sin embargo, en algunos países es común agregar mayores porcentajes de cemento mientras se estabiliza con una concentración similar de emulsión asfáltica.

4.4.2.2.1.1 Tipos de emulsiones asfálticas.

Existen dos tipos de emulsiones asfálticas: aniónicas y catiónicas, que se diferencian básicamente por la carga de los iones de asfalto dispersos y de la fase continua. En una emulsión aniónica las partículas de asfalto se encuentran cargadas negativamente en una

fase alcalina, mientras que en la catiónica las partículas de asfalto poseen carga positiva en una fase ácida. Ciertos productos químicos, conocidos como “estabilizantes”, se agregan a los dos tipos de emulsiones con el propósito de incrementar el tiempo de rotura al reducir la magnitud de la carga sobre las partículas de asfalto y su atracción con los agregados, retardando de esta manera la rotura o la atracción de las partículas de asfalto a los agregados.

⁹Cualquiera que sea el tipo de emulsiones asfálticas debe reunir los requerimientos de la ASTM D 977, *emulsiones asfálticas*, o ASTM D 2397, *emulsiones asfálticas catiónicas*, pueden ser usadas para mezclas de reciclaje en frío. Las pautas generales para la selección son dadas en la **Tabla 4.1**.

Un indicador inicial de que sí la emulsión aniónico o catiónico es más compatible con los agregados puede ser determinado en base a la ASTM D 244, *Métodos de pruebas estándar de emulsiones asfálticas*.

Las pruebas de asfalto emulsionado deben lograrse conforme se establece a los parámetros establecidos en la sección 703 de las especificaciones SIECA.

En la **tabla 4.1** se han listado calidades normales de asfalto emulsionado. Para ciertos agregados otros tipos de condiciones climáticas pueden ser apropiados. En tales casos el proveedor de la emulsión debe consultarse.

⁹ Basado en Asphalt cold-mix recycling, MS-21 del Instituto del Asfalto.

TABLA 4.1 Guía para los usos de emulsiones asfálticas

Tipo de mezcla fría Reciclada	Grado (tabla 4.2)	ASTM D 977 Aniónico					ASTM D 2397 Catiónico			
		MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h
Planta de mezcla:										
Agregado de grado Abierto	A, B, C	X	X				X	X		
Agregado de grado Denso	D			X	X	X			X	X
Arena	E, F			X	X	X			X	X
Mezcla en el sitio										
Agregado de grado Abierto	A, B, C	X	X				X	X		
Agregado de grado Denso	D			X	X	X			X	X
Arena	E, F			X	X	X			X	X
Suelo arenoso	G			X	X	X			X	X

Mientras puedan darse pautas generales para seleccionar emulsiones, las pruebas de laboratorio son fuertemente recomendadas. No hay buenos substitutos para una evaluación de laboratorio de emulsión y de agregados a ser usados. Diferentes tipos y cantidades de emulsión deben tratarse con los agregados para encontrar la mejor combinación para proponer usarla. Una experiencia de un técnico puede determinar el tipo y cantidad de emulsión a usar. El puede también determinar si agua adicional debe agregarse, y la cantidad de tiempo para que ocurra un cambio.

La selección del tipo y grado de emulsión es usualmente hecha después de tener determinado la gradación del agregado. Las siguientes pautas pueden ser usadas para seleccionar el producto de emulsión asfáltica.

- *Emulsiones de composición media.* Los grados de composición media son apropiadas para el diseño de mezcla con agregados gruesos. Por que estos grados no se quiebran inmediatamente en contacto con agregados, y al usarlos en mezclas permanecen laborables durante un tiempo corto.

Por la gran trabajabilidad de emulsiones asfálticas de composición media puede dar un mejor cubrimiento al agregado y retención de asfalto bajo las condiciones de temperatura extremas. Ellas pueden ser usadas con agregados de gradación densa o gruesa.

- *Emulsiones de composición baja.* Los grados de composición baja son diseñados para mezclas de máxima estabilidad. Ellas son usadas con altos contenidos de finos, grados densos de agregados. Todo grado de composición baja tiene baja viscosidad esto puede reducir la adición de agua.

La consideración de las condiciones climáticas anticipadas durante la construcción es importante cuando usamos emulsiones asfálticas. La regla general es la selección del equipo el cual proporcione una rápida construcción. La planta central de mezclas debe estar preferentemente, seguida estrechamente por plantas móviles. La producción en altas proporciones puede lograrse en tiempo bueno y el proyecto puede detenerse fácilmente ante las inclemencias de tiempo. La construcción de mezcla en el lugar (como cuchillas que mezclen) es menos deseable si las áreas son largas y están

expuestas durante la mezcla. La lluvia podría incrementar el contenido anterior de humedad óptima, requiriendo por lo tanto aireación. Por otro lado, la conveniencia de la ubicación de la planta central depende de la disponibilidad de la planta dentro de una distancia de acarreo económica.

¹⁰En algunos países, los recicladores confunden las emulsiones aniónicas y las emulsiones catiónicas, especialmente en cuanto a sus condiciones de rotura. Se ha dicho que las aniónicas solamente rompen cuando el agua, en la cual se encuentra suspendido el asfalto, se evapora o es absorbida por el agregado o el cemento. Por otra parte, se supone que las emulsiones catiónicas rompen "químicamente", lo que implica que se agreguen químicos especiales durante su proceso de manufactura, que causarán que el asfalto se separe del agua después de un período específico de tiempo. Esto no es del todo cierto. Ambos tipos de emulsiones se comportan de la misma manera en su rompimiento cuando se retira físicamente el agua y ambos romperán si la carga sobre las partículas del agregado es opuesta a la de las partículas de asfalto, generándose atracción entre ellos.

La razón exclusiva para usar un asfalto emulsificado como agente estabilizador es posibilitar su mezcla con los agregados fríos y húmedos. Esta es una fase transitoria y el producto final deseado corresponde a un material ligado con asfalto que requiere que éste rompa fuera de la suspensión, con el objeto de actuar como un ligante. Las condiciones de rotura son, por tanto, importantes y no el ambiente en el cual el asfalto está suspendido en el agua.

¹⁰ Extraído del manual de reciclaje en frío Wirtgen, 2^{da} edición Septiembre del 2001

4.4.2.2.1.2 El trabajo con emulsiones asfálticas¹¹

Cuando se recicla con emulsión, los siguientes puntos son importantes y deben cumplirse:

- **Diseño de la mezcla.** Como con cualquier forma de estabilización, debe seguirse un procedimiento apropiado para el diseño de la mezcla con el fin de establecer la concentración correcta con la que se alcancen los criterios de resistencia. Materiales diferentes requieren dosificaciones distintas de la emulsión para lograr la resistencia óptima.
- **Formulación.** Diferentes productos químicos se usan en proporciones variables para ajustar la emulsión a una aplicación específica. Este ajuste consiste en determinar la cantidad de asfalto residual y en controlar las condiciones en las cuales se presenta la rotura. Debido a que el tipo de material, que se mezcla con la emulsión, tiene una mayor influencia sobre la estabilidad (tiempo de rotura) es importante que al fabricante se le entregue una muestra representativa del material que se reciclará. Así mismo, deben suministrarse los detalles de cualquier agente estabilizador cementante que vaya a incorporarse junto con la emulsión, con el objeto de realizar su correcta formulación.
- **Manejo.** Las emulsiones asfálticas son susceptibles a la temperatura y a la presión. Deben entenderse claramente las condiciones que promueven al asfalto a disgregarse de la suspensión (lentamente como "floculación" o de forma instantánea como rotura instantánea o relámpago) con el propósito de prevenir que esta disgregación suceda en el campo. De igual manera, para obtener una correcta formulación de la emulsión, el

¹¹ Ibidem

fabricante ha de conocer las condiciones prevalecientes en obra, incluyendo los detalles de todas las bombas que se utilizarán para transferir la emulsión entre tanques y para suministrar a la barra de rociado en la recicladora.

- **Contenido total de fluidos.** El control de la humedad en el material reciclado es uno de los aspectos más importantes de la estabilización con emulsiones asfálticas, y es por esta razón que se considera por separado en la sección 4.4.2.2.1.3.

- **Tiempo para la compactación.** Cuando la emulsión rompe, el asfalto sale de la suspensión volviendo a su forma viscosa. Las partículas individuales del material reciclado se cubrirán total o parcialmente con una película fina de asfalto frío y viscoso, dificultando su compactación; por tanto, la compactación debe completarse antes de que la emulsión haya roto.

- **Control de calidad.** Normalmente se manufacturan probetas (para los ensayos de resistencia) usando muestras tomadas de la mezcla dejada por la máquina recicladora. Estas briquetas deben compactarse antes de que rompa la emulsión, obteniendo muestras que reflejen las condiciones del material compactado en la vía. Un sistema móvil de compactación Marshall en el sitio es, a menudo, la única forma de fabricación de probetas. Alternativamente, pueden extraerse núcleos una vez que la capa haya curado por completo.

- **Curado (velocidad de ganancia de resistencia).** Aun cuando algunos materiales estabilizados con emulsiones asfálticas pueden alcanzar su resistencia total en un corto periodo de tiempo (un mes), en otros materiales el curado puede tener lugar en más de un año. La duración de este período se ve afectada por:

- El tipo y la calidad de la emulsión asfáltica.
- El contenido de humedad del material durante la compactación.
- La densidad alcanzada (indicativa del contenido de vacíos).
- El tipo de agregado, incluyendo su gradación y sus propiedades de absorción.
- La cantidad de cemento o de cal incorporada.

La adición de cemento tiene un impacto significativo sobre la velocidad con que se gana resistencia. Sin embargo, diversas investigaciones han mostrado que la adición de más del 2% de cemento afecta de manera negativa las propiedades de fatiga de la capa estabilizada y por esta razón la cantidad de cemento usualmente se limita al 2 %.

4.4.2.2.1.3 El concepto de la cantidad total de fluidos¹²

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, en la definición de la relación humedad / densidad se emplea el concepto de "contenido total de fluidos" en lugar del concepto de contenido de humedad. La máxima densidad se alcanza con el contenido óptimo de fluidos totales (OTFC = Optimum Total Fluid Content), que corresponde a la suma de las masas, en la mezcla, de humedad y emulsión asfáltica (antes de la rotura). Antes de la rotura, la emulsión asfáltica es un fluido que presenta una viscosidad similar a la del agua. Si se agrega un 5 % de emulsión con un contenido de asfalto residual del 60 %, los fluidos incorporados serán del 5 % y no solamente del 2 %, correspondiente al componente de agua. Como el contenido total de fluidos resultante en un material (contenido de fluidos en el campo) excede OTFC, es difícil compactar la mezcla a la densidad requerida. Si el contenido de fluidos en el campo es demasiado alto, superando

¹² Ibidem

el de fluidos de saturación de la mezcla, entonces se desarrollarán presiones hidráulicas que originan la expansión del material con la acción de los equipos de compactación. Al alcanzarse estas condiciones, es imposible compactar el material.

Cuando la humedad del material en el pavimento existente está próxima al OTFC, la incorporación de la emulsión invariablemente incrementará el contenido total de fluidos más allá del punto de saturación. Esto no puede enmendarse reduciendo la cantidad de fluidos que son agregados, y con la incorporación de cemento sólo se logra de manera parcial la corrección. (Como ya se mencionó, la cantidad de cemento que puede incorporarse se encuentra limitada.) Por lo general esta situación se supera, permitiendo que el material fresado se seque suficientemente antes de la estabilización.

4.4.2.2.1.4 Criterios para las capas estabilizadas con emulsión asfáltica¹³

A continuación se dan las propiedades más importantes, aplicables a los materiales estabilizados con emulsión asfáltica. Estas propiedades se alcanzan cuando se optimiza la dosificación de la emulsión, a partir de un procedimiento de diseño de la mezcla. Adicionalmente al 1 o 2 % de cemento incorporado, se manejan los siguientes rangos de asfalto residual:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 1,5 a 3,0
- Piedra triturada - 2,5 a 4,0 %
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 3,0 a 4,5%

- **Resistencia.** Los materiales estabilizados con asfalto normalmente se evalúan mediante la resistencia a la tracción indirecta (ITS = Indirect Tensile Strength) y no con

¹³ Ibidem

los ensayos Marshall. El ensayo se realiza sobre probetas tipo Marshall, a una temperatura de 25°C. Los siguientes valores de la ITS (en condición seca) son típicos:

Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 350 a 750 kPa

- Piedra triturada - 400 a 800 kPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 250 a 500kPa

- **Rigidez.** El módulo resiliente de un material estabilizado con asfalto se mide sometiendo la muestra a un ensayo con cargas repetitivas. Los valores típicos son:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 2500 a 5000 MPa
- Piedra triturada - 3000 a 6000 MPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 2000 a 4000 MPa

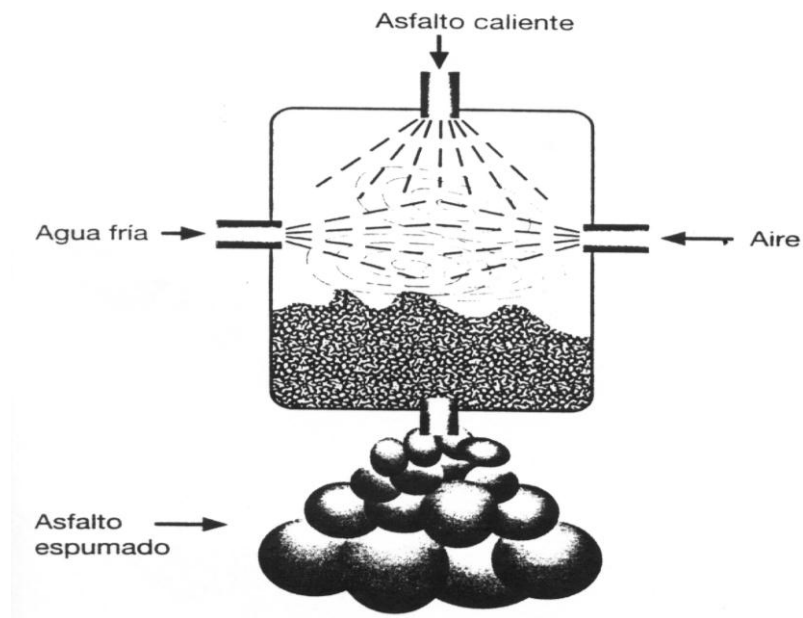
- **Tiempo de procesamiento.** Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas no se especifica un tiempo límite fuera del requerido para completar todo el procesamiento, la compactación y el terminado antes de que rompa la emulsión.

- **Densidad.** Para cada ensayo, normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 98 % de la densidad AASHTO modificada. Como ya se describió para los materiales tratados con cemento, el término "promedio" se incluye algunas veces cuando se acepta una variación de densidad dentro de la capa. Cuando esto se permita, la densidad en el tercio inferior de la capa no debe ser menor en un 2 % del valor promedio especificado.

4.4.2.2 Estabilización con asfalto espumado¹⁴

El espumado ocurre cuando se agrega una pequeña cantidad de agua al asfalto caliente, incrementando así el área superficial y reduciendo significativamente la viscosidad del asfalto. Esta forma de asfalto es adecuada para su mezcla con agregados fríos y húmedos. El sistema desarrollado por Wirtgen a mediados de los años noventa, inyecta tanto aire como agua en el asfalto en una cámara de expansión, como se muestra en la Figura 4.1.

Fig. 4.1 Cámara de expansión



El asfalto espumado puede usarse como agente estabilizador de una gran variedad de materiales; desde piedras trituradas de buena calidad hasta gravas marginales con una plasticidad relativamente alta. Sus principales ventajas frente a las emulsiones asfálticas, en los procesos de estabilización, son:

- ✓ Se reducen los costos de transporte debido a que la espuma de asfalto se fabrica a

¹⁴ Ibidem

partir de asfaltos de penetración estándar y solamente un pequeño porcentaje de agua, por lo regular 2 % por masa de asfalto. Con el asfalto espumado no se incurre en otros costos de manufactura adicionales a la inversión inicial en los equipos.

- ✓ El material tratado con asfalto espumado puede colocarse, compactarse y abrirse al tráfico inmediatamente después del mezclado.
- ✓ Los materiales tratados con asfalto espumado permanecen trabajables por largos períodos y pueden operarse en condiciones adversas de tiempo, sin presentarse el lavado del asfalto de los agregados.

De manera similar a las estabilizaciones con emulsión asfáltica, normalmente al material tratado con asfalto espumado se le agregan pequeñas cantidades de cemento o de cal; esto no sólo mejora la resistencia conservada sino que colabora con la dispersión del asfalto al incrementar la fracción inferior a 0,075 mm, como se describe más adelante.

4.4.2.2.2.1 Características del asfalto espumado

Los principales factores que afectan el uso de un asfalto espumado como agente estabilizador son:

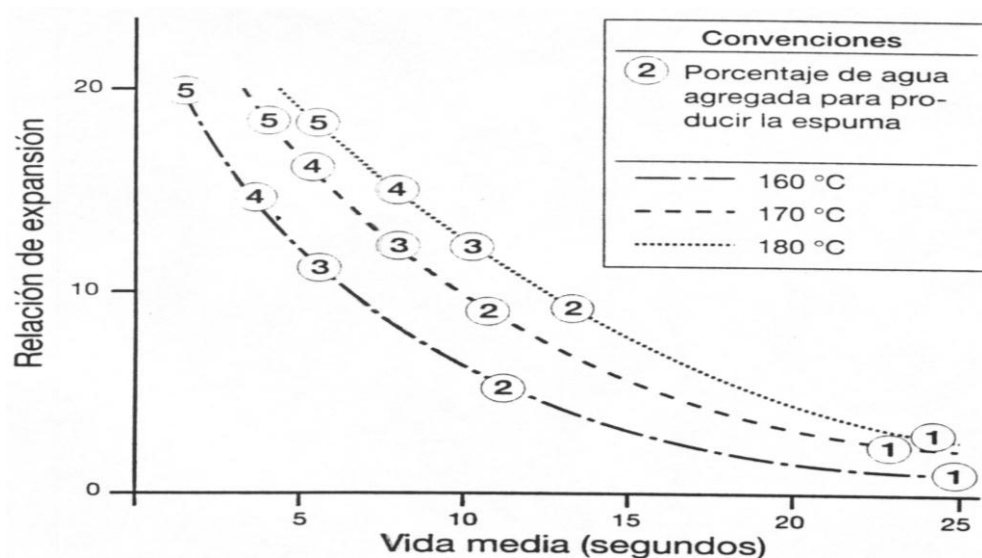
- **Las propiedades de la espuma.** El asfalto espumado se caracteriza en términos de la relación de expansión y de la vida media. La relación de expansión se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar. La vida media corresponde al tiempo transcurrido, en segundos, que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido.

Las características de espumado de un asfalto específico están influenciadas por numerosos factores, siendo los más importantes los siguientes:

- ✓ La temperatura del asfalto. Las características de espumado de muchos asfaltos se mejoran con el aumento de la temperatura.
- ✓ La cantidad de agua agregada al asfalto. Generalmente, la relación de expansión se incrementa con el aumento en la cantidad de agua agregada, mientras que la vida media disminuye.
- ✓ La presión con la cual se inyecta el asfalto dentro de la cámara de expansión. Bajas presiones afectan negativamente la expansión y la vida media.
- ✓ La presencia de agentes antiespumantes, tales como los compuestos de silicona.

Formalmente estas características se representan de manera gráfica, como se muestra en la Figura 4.2.

Fig. 4.2 Características típicas de espumado



Generalmente se considera que la "mejor" espuma es aquella para la cual se optimizan a expansión y la vida media. En el ejemplo de la Figura 4.2 se muestra que con una temperatura superior a los 170°C y con un contenido de agua de cerca del 2,5 % se producirá una espuma con una relación de expansión de once y una vida media de nueve segundos. Las características de espumado corresponden más a órdenes de magnitud que a medidas exactas. De esta manera, la relación de expansión del ejemplo debe interpretarse como > 10 , o entre 10 y 15. Igualmente, la vida media debe reportarse entre cinco y diez segundos.

En general, cuando mejores sean las características de espumado, mejor será la calidad de la mezcla resultante. Cuando se usa el asfalto espumado como agente estabilizador, no existen (límites absolutos que gobiernen sus características. Altas relaciones de expansión obtenidas sacrificando la vida media, o viceversa, dan lugar a mezclas de mala calidad en comparación con la de las mezclas obtenidas cuando las dos características son óptimas. La calidad de la mezcla debe evaluarse sometiendo las probetas Marshall a ensayos de resistencia y no juzgarse únicamente mediante la inspección visual. Sin embargo, cuando las características de espumado son muy pobres (relación de expansión menor que cinco y vida media menor que cinco segundos) resulta difícil elaborar una mezcla aceptable. Por estos motivos han de considerarse el uso de asfaltos de diferentes fuentes o la adición de una agente promotor de espumado.

- **Grado y reología del asfalto.** Los asfaltos blandos regularmente poseen mejores características de espumado. La selección del tipo de asfalto que se va a usar (grado de

penetración) está altamente influenciada por la temperatura ambiente. Para climas calientes se prefieren asfaltos duros (grado de penetración < 100). En este caso también puede considerarse el empleo de asfaltos blandos, verificando primero su comportamiento mediante ensayos comparativos de resistencia.

Adicionalmente, un excesivo contenido de asfáltenos en los asfaltos tiene una influencia negativa sobre las características de espumado, ya que mientras mayor es la proporción de asfáltenos, peores son las características de la espuma.

- **Dispersión del asfalto.** A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, los materiales estabilizados con asfalto espumado no son negros, debido a que las partículas gruesas del agregado no están cubiertas y usualmente están libres de asfalto. Cuando el asfalto espumado entra en contacto con el agregado, las burbujas estallan en millones de "partículas" diminutas que se dirigen y adhieren a las partículas finas, en especial a la fracción inferior a 0,075 mm. Esto da lugar a un llenante ligado con asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas. Después de su tratamiento, existe por tanto solamente un ligero oscurecimiento del color en el material.

Particularmente cuando el material reciclado presenta deficiencia en la fracción fina (v.g., menos del 5 % pasa el tamiz de 0,075 mm), la adición de cemento, cal o de otros materiales finos (100 % pasa el tamiz de 0,075 mm) colabora con la dispersión del asfalto.

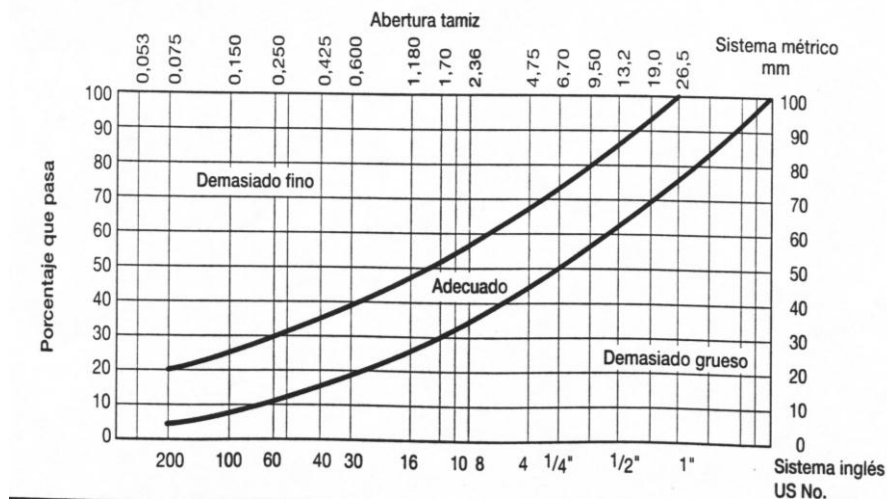
4.4.2.2.2 El trabajo con asfalto espumado

Cuando se trabaja con asfalto espumado, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ **Aspectos de seguridad.** Para producir una espuma aceptable, se requieren altas temperaturas del asfalto (generalmente 170°C) para reaccionar con el agua. A tales temperaturas el asfalto es una sustancia letal y si no se maneja correctamente puede producir la muerte. Lo anterior es bien conocido por fabricantes de mezclas en caliente, quienes tienen que trabajar a diario con el asfalto caliente; sin embargo, los contratistas del reciclaje que desarrollan por primera vez un proyecto con asfalto espumado, deben asegurarse de que su personal reciba un entrenamiento apropiado.

- ✓ **Conveniencia de los materiales.** Un material con deficiencia de finos no mezclará bien con el asfalto espumado. Como se muestra en la Figura 4.3, el requerimiento mínimo es del 5 % de material inferior a 0,075 mm (pasa tamiz N° 200). Cuando los finos en un material son insuficientes, la espuma de asfalto no se dispersa de manera apropiada tendiendo a formar, a través del material reciclado, lo que se conoce como "grumos", o aglomeraciones de los finos ricas en asfalto. Estos grumos varían en tamaño de acuerdo con la deficiencia de finos; una gran deficiencia dará lugar a muchos grumos de mayor tamaño que tenderán a actuar como un lubricante en la mezcla y conducirán a una reducción en la resistencia y en la estabilidad de la misma.

Fig. 4.3 Materiales adecuados para tratarse con asfalto espumado.



Ensayos simples de laboratorio, llevados a cabo sobre muestras representativas tomadas de la carretera existente, indicarán cualquier deficiencia potencial en el contenido de finos, pudiendo rectificar la gradación con material fino de importación que se esparcirá sobre la superficie antes de proceder al reciclaje. Los materiales cohesivos deben tratarse con cuidado, aun cuando la gradación del laboratorio indique un alto porcentaje de material que pasa el tamiz de 0,075 mm, ya que a menudo la calidad de la mezcla que se obtiene en el campo es pobre. Esto se debe a que la naturaleza cohesiva del material origina el aglutinamiento de las partículas finas, haciéndolo inaceptable para su tratamiento con asfalto espumado. Una comparación de los ensayos granulométricos, efectuados en el laboratorio, sobre el material lavado y sin lavar, indicará la posibilidad de que este problema se desarrolle. La gradación sin lavado es un buen indicador de la cantidad de finos disponibles.

Un material con deficiencia de finos puede mejorarse con la adición de cemento, cal o de otro material que posea un 100 %, pasando el tamiz de 0,075 mm. Con todo, debe

evitarse el empleo de cemento en cantidades superiores al 2 % debido a su efecto negativo sobre las propiedades de fatiga de la capa estabilizada.

✓ **Consistencia del suministro de asfalto.** Cuando se acopla un nuevo carrotanque de asfalto a la máquina recicladora deben verificarse dos aspectos básicos, con el objeto de asegurarse de que éste es aceptable para el espumado.

- La temperatura del asfalto dentro del tanque debe verificarse usando un termómetro calibrado (los medidores fijos en los tanques resultan notoriamente imprecisos).
- La calidad de espumado debe verificarse usando para tal efecto la boquilla de ensayo de la máquina recicladora. Con el propósito de obtener una muestra completamente representativa, esta verificación debe esperar hasta que como mínimo hayan pasado a través de la barra de rociado cien litros de asfalto, mientras se está reciclando.

✓ **Flujo de asfalto.** Algunas veces el asfalto, que se despacha al sitio mediante carrotanques que tienen adaptado un tubo de calentamiento, se encuentra contaminado con pequeñas piezas de carbón que se forman sobre las paredes del tubo durante su calentamiento. Con el drenaje desde el tanque de las últimas toneladas de asfalto, estas partículas indeseables tienden a entrar en el sistema de la máquina recicladora y causar una posible obstrucción. Este problema se resuelve fácilmente asegurando la efectividad del filtro que se encuentra en la línea de suministro. Cualquier incremento inusual de la presión indicará que el filtro requiere limpieza, procedimiento que de todas formas debe llevarse a cabo a

intervalos regulares (por ejemplo, al finalizar cada cambio de carrotanque de asfalto).

✓ **Aplicación de agentes estabilizadores cementantes junto con asfalto espumado.**

Como ya se ha descrito, es común adicionar pequeñas cantidades de cemento o de otros agentes estabilizadores cementantes cuando se recicla con asfalto espumado. Debe tenerse cuidado cuando se mezcla el material con cemento, cal o con otro agente similar, realizando una pasada inicial. El proceso de cementación - que comienza tan pronto como el polvo seco entra en contacto con la humedad - tiende a ligar los finos, reduciendo efectivamente la fracción de 0,075 mm. La calidad de la mezcla cuando se incorpore el asfalto espumado será deficiente, a causa de la insuficiencia de finos disponibles para la dispersión de las partículas de asfalto.

✓ **Reprocesamiento de la capa terminada.** El material tratado con asfalto espumado puede re-procesarse sin afectar su resistencia última, siempre y cuando se asegure de que se mantenga el contenido de humedad aproximadamente en el mismo nivel en que se encontraba en el momento de la compactación. La anterior característica resulta benéfica cuando la vía tiene que abrirse de manera temprana al tráfico, aun cuando no se haya completado la terminación de los trabajos. El material puede reprocesarse al día siguiente (por lo general fresándolo primero) para luego hacer su terminado de manera apropiada. Sin embargo, si se permitió el secado, el reprocesamiento afectará negativamente la resistencia última del material.

✓ **Control de calidad.** Las muestras tomadas de la mezcla dejada atrás por la máquina recicladora no necesitan compactarse dentro de un tiempo específico, si

son guardadas dentro de un recipiente sellado. Las probetas pueden elaborarse en una etapa posterior, e incluso, si es necesario, varios días después.

4.4.2.2.3 Criterios para las capas estabilizadas con asfalto espumado

A continuación se presentan las propiedades más importantes aplicables a los materiales estabilizados con asfalto espumado, las cuales se alcanzarán cuando la aplicación de la espuma de asfalto sea óptima, de acuerdo con el procedimiento de diseño de la mezcla. Adicionalmente a la incorporación de 1 a 2 % de cemento, la cantidad de asfalto por lo general se encuentra en el siguiente rango:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 1,5 a 3,0 %
- Piedra triturada - 2,5 a 4,0 %
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 3,0 a 4.5 %

- ✓ **Resistencia.** Los materiales estabilizados con asfalto normalmente se evalúan mediante la resistencia a la tracción indirecta (ITS) y no con los ensayos Marshall. El ensayo se realiza sobre probetas tipo Marshall, a una temperatura de 25°C y son típicos los siguientes valores de la ITS:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 350 a 800 RPa
- Piedra triturada - 400 a 900 kPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 250 a 500 kPa

- ✓ **Rigidez.** El módulo resiliente de un material estabilizado con asfalto se mide sometiendo la muestra a un ensayo con cargas repetitivas. Los valores típicos son:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) - 2500 a 5000 MPa
- Piedra triturada - 3000 a 6000 MPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) - 2000 a 4000 MPa

- ✓ **Tiempo de procesamiento.** No se tiene un límite específico de tiempo para los trabajos con asfalto espumado. El período de trabajo puede extenderse indefinidamente si se mantiene el contenido de humedad próximo al óptimo.
- ✓ **Densidad.** Para cada ensayo, normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 98 % de la densidad AASHTO modificada. Como ya se describió, el término "promedio" se incluye algunas veces cuando se acepta una variación de densidad dentro de la capa. Cuando esto se permita, la densidad en el tercio inferior de la capa no debe ser menor en un 2 % del valor promedio especificado.

4.4.2.3 El asfalto.¹⁵

La selección del tipo y grado de cemento asfáltico o emulsiones asfálticas por cada proyecto es importante. Primeramente las consideraciones deberían estar dadas por el tipo y el grado realizado satisfactoriamente en un proyecto local con la graduación de los agregados y condiciones de tráfico similares a aquellos en el proyecto en estudio. Adicionalmente, las especificaciones estándar de los asfaltos sirven de ayuda en la selección del material correcto para cada proyecto, proporcionando una comparación clara, comparación significativa entre los tipos y calidades. Sin embargo, más allá de las

¹⁵ Basado en Asphalt cold-mix recycling, MS-21 del Instituto del Asfalto.

especificaciones, el juicio independiente debe ejercerse todavía haciendo la selección. En la decisión debe considerarse el uso del pavimento completo, condiciones ambientales localizadas en el pavimento, tipo de equipo disponible y operaciones de construcción. Este criterio es establecido sobre tres consideraciones de ingeniería:

- 1- Propiedades del asfalto
- 2- Consistencia
- 3- Curado.

Un campo de reglas de larga duración es: usar el pavimento más pesado que pueda rápidamente ser trabajado. Aplicando estas reglas que dan el tipo de equipo de mezcla, agregados, y firmes, deben de considerarse en la selección del grado de asfalto.

- La Viscosidad es una medición de consistencia asfáltica. La viscosidad del asfalto se incrementa con la disminución de temperatura. Por que el asfalto usado en mezcla en frío debe ser prontamente laborables a temperaturas encontradas durante la construcción, la viscosidad de materiales asfálticos a temperatura ambiente deben ser consideradas. Cuando una mezcla tiene una alta proporción de materiales finos que pasan el tamiz 75 μm (Nº 200), la mezcla es usualmente difícil, y los asfaltos de media a baja viscosidad pueden ser más efectivos. Con menos finos que pasen la malla 75 μm (Nº 200), la mezcla es algo mas fácil y un asfalto de más alta viscosidad puede ser usado.

Las siguientes especificaciones son aplicadas a cemento asfáltico para reciclaje en frío:

AC - 2.5	ASTM D 3381
AR - 1000	ASTM D 3381
200 - 300 penetraciones	ASTM D 946

Temperatura del asfalto y otros aspectos ver sección 702 de las especificaciones SIECA.

4.4.2.4 Agua.¹⁶

El reciclaje puede requerir humedecer el agregado para facilitar cubrirlo y compactarlo.

- *Cemento Asfáltico.*

Para mezclar con cemento asfáltico, el contenido de humedad de los materiales a ser reciclados debe ser de 4 – 6% a causa del cemento asfáltico en caliente espumado y por eso sirve como una ayuda para revestir.

- *Emulsiones Asfálticas.*

No toda el agua es compatible con los asfaltos emulsificados, por lo tanto una muestra de agua disponible debe ser mezclada con una muestra del asfalto emulsificado en la misma relación que pretende ser usada en la carretera. Si se tienen efectos adversos en el asfalto emulsificado es indicativo, que una nueva fuente de agua debe ser establecida.

Emulsiones de composición baja o media necesitan humedad para la mezcla. Los grados del HFMS (particularmente la HFMS-2s) y la CMS-2 y 2h de emulsiones, a lo largo con otras modificaciones disponibles, conteniendo una cantidad de petróleos destilados. Estos productos se realizan mucho mejor con agregados secos (mezclando, poniendo, etc.) que con agregados húmedos.

¹⁶ Ibidem

4.4.3 Diseño de mezcla de reciclado en frío.

Para el reciclado de mezcla en frío, el objetivo primario del diseño de la mezcla es producir una mezcla comparable a una hecha con todos los materiales nuevos. Sin embargo, no hay universalmente aceptado ningún método de diseño de mezcla para el reciclado de mezcla en frío. En general, pruebas de laboratorio, formulas empíricas o experiencias pasadas con proyectos idénticos son usados para establecer el contenido inicial de asfalto, con la intención de ajustar esto, si es necesario, después de que la construcción ha empezado.¹⁷

En vista que el proceso de reciclaje en frío puede realizarse tanto en planta como In-situ y los criterios referentes al diseño de la mezcla reciclada varían un poco uno del otro de acuerdo a lo siguiente:

- ✓ **Reciclado in situ:** básicamente el diseño de la mezcla reciclada consiste en llevar la granulometría de los materiales de la carpeta asfáltica existente (RAP) y parte base granular (RAM) dependiendo del espesor a reciclar, a una de las granulometrías especificadas en la **tabla 4 .2** , si es que estos no la cumplen , la corrección de la granulometría se realiza agregando material nuevo, por lo que los ensayos de laboratorio de muestras representativas del pavimento a reciclar desempeñan un papel sumamente importante para definir la gradación del material existente, el tipo y cantidad de agente estabilizador a utilizar durante el reciclado in-situ.

¹⁷ Ibidem

- ✓ **Reciclado en planta:** en este proceso los materiales son escarificados tanto de la carpeta asfáltica como de la base granular para ser llevados a una planta en donde se determinan sus granulometrías por separado y fácilmente estos se combinan en porcentajes determinados para hacerlos llegar a una granulometría especificada agregando material nuevo si es necesario, luego se procede a la determinación del tipo y cantidad de agente estabilizador a utilizar en la mezcla reciclada.

En las secciones siguientes se desarrolla un diseño de mezcla para reciclado en planta por ser un tanto más compleja la combinación de agregados ya que considera la carpeta asfáltica, base granular y agregado nuevo por separado mientras que el reciclado in situ combina la mezcla de base y carpeta como una sola granulometría con material nuevo cuando es necesario.

4.4.3.1 Pasos de preparación.

Este procedimiento de diseño de mezcla provisional es el siguiente:

El agregado de un pavimento asfáltico recuperado (Carpeta; RAP) es mezclado con agregado de material recuperado (base granular; RAM) y/o nuevo agregado que es requerido para obtener una gradación de agregado combinado encontrándose los requerimientos de la especificación. Una vez las proporciones relativas de agregado son determinadas, una calidad de nuevo asfalto se selecciona. Una demanda total del asfalto para la mezcla es determinada. Los cálculos siguen para estimar la cantidad requerida de

nuevo asfalto por reciclar. Siguiendo estas determinaciones, al contenido de asfalto se le hacen ajustes hechos de los ensayos de campo.

4.4.3.2 Diseño de la mezcla.

Con la información obtenida de la evaluación de materiales el diseño de la mezcla de reciclaje en frío puede ser formulado.

La **Figura 4.4** es una carta de flujo que parte los pasos para este procedimiento de diseño provisional. Los pasos son:

(1) Combinación de los agregados en la mezcla reciclada. Usando la gradación de los agregados del pavimento asfáltico reciclado (carpeta asfáltica), el material agregado recuperado (es cualquier material granular que sirva de base a la superficie o carpeta asfáltica) y el nuevo agregado, dan una gradación combinada que reúne los requisitos de la especificación deseada y es calculada.

Como una manera práctica, la mayoría de las especificaciones de reciclaje de mezcla en frío permite una variación razonable en gradaciones aceptables (**ver, tabla 4.2**), y la corrección por adicionar nuevo agregado no es normalmente requerido. La gradación del material probado siempre debe evaluarse.

(2) Selección del grado del asfalto nuevo. La calidad de asfalto es seleccionada utilizando las pautas generales dadas para el cemento asfáltico, emulsión asfáltica y selección del asfalto, vistas anteriormente.

(3) *Demanda del porcentaje de asfalto de la combinación de agregados* La demanda de asfalto de la combinación de agregados puede ser calculada por la formula empírica:

$$P_c = \frac{0.035a + 0.045b + KC + F}{R}$$

Donde:

P_c = Porcentaje* de material asfáltico por peso de la mezcla total.

K = 0.15 para 11-15 porcentaje que pasa la malla 75 μ m (No 200)

0.18 para 6-10 porcentaje que pasa la malla 75 μ m (No 200)

0.20 para el 5 por ciento o menos que pasa la malla 75 μ m (No 200)

a = Porcentaje* de agregado material retenido en la malla 2.36 mm (No 8)

b = Porcentaje* de agregado material que pasa la malla 2.36 mm (No 8) y retenido en la malla 75 μ m (No 200)

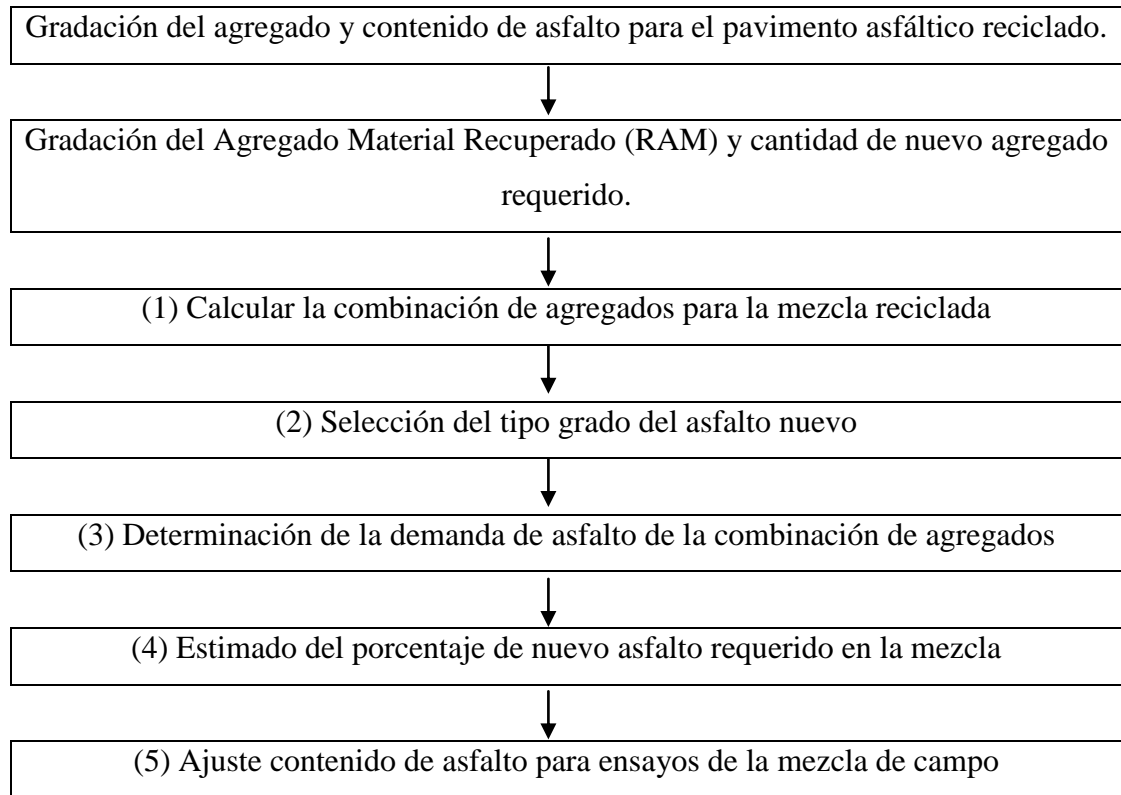
c = Porcentaje* de agregado material que pasa la malla 75 μ m (No 200)

*Expresado en número entero.

F = 0 a 2.0 por ciento. Basado en la absorción del agregado. La formula es basada en un promedio de gravedad específica de 2.6 a 2.7. En la ausencia de otros datos de un valor de 0.7 a 1.0 debe cubrir la mayoría de las condiciones.

R = 1.0 para cemento asfáltico; 0.60 a 0.65 para emulsiones asfálticas.

Fig. 4.4 Diagrama de flujo del procedimiento de diseño de mezcla en frío.



(4) *Porcentaje de Nuevo Asfalto en la Mezcla.* La cantidad de nuevo asfalto a ser adicionado a la mezcla reciclada iguala a la demanda de asfalto calculado (paso (3)) menos el porcentaje de asfalto en el pavimento de asfalto recuperado.

La formula es:

$$P_r = P_c - \frac{(P_a \times P_p)}{R}$$

Donde: P_r = Porcentaje* de asfalto nuevo en la mezcla reciclada

P_c = Porcentaje* de asfalto por peso de la mezcla total

P_a = Porcentaje* de asfalto en el pavimento asfalto recuperado

P_p = Porcentaje decimal del pavimento asfáltico recuperado en la mezcla reciclada

R = 1.0 para el cemento asfáltico en el pavimento recuperado; 0.60 a 0.65 para Emulsiones asfálticas; 0.70 a 0.80 para asfalto cutback (asfalto rebajado)

* Expresado como un número entero.

En construcción in situ es a menudo deseable proporcionar asfalto basado en el peso de agregado P_d , esta conversión es como sigue:

$$P_d = \frac{100P_r}{100 - P_r}$$

P_d = Porcentaje expresado como un número entero, del asfalto nuevo por peso de Agregados

(5) *Ensayos a la mezcla de campo* El ajuste final del contenido de asfalto puede ser hecho por el ingeniero en campo para obtener una carretera durable (basado en la necesidad de minimizar deformación y descomposición térmica).

En la siguiente tabla se presentan los lineamientos para la gradación de la mezcla reciclada en frío.

TABLA 4.2 Lineamientos para la gradación de la mezcla reciclada en frío.

tamaño de la malla	Pesos en porcentaje que pasa						
	Grado abierto			Grado denso			
	A	B	C	D	E	F	G
38.1 mm (1 1/2 pulg)	100			100			
25.0 mm (1 in.)	95-100	100		80-100			
19.0 mm (3/4 in)		90-100					
12.5 mm (1/2 in)	25-60		100		100	100	100
9.5 mm (3/8)		20-55	85-100				
4.75 mm (No 4)	0-10	0-10		25-85	75-100	75-100	75-100
2.36 mm (No 8)	0-5	0-5					
1.18 mm (No 16)			0-5				
300 μm (No 50)						15-30	
150 μm (No 100)							15-65
75 μm (No 200)	0-2	0-2	0-2	3-15	0-12	5-12	12-20

4.4.4 Ejemplo de diseño¹⁸.

Una carretera rural se prueba y se encuentra que necesita 25mm (1 pulg.) de tratamiento de superficie de asfalto más 175mm (7 pulg.) de base de piedra sin tratar. El pavimento será reciclado a una profundidad de 125mm (5 pulg.). La prueba de extracción de asfalto

¹⁸ Basado en Asphalt cold-mix recycling, MS-21 del Instituto del Asfalto. ejemplo de reciclado en planta y utilizando emulsión asfáltica como agente estabilizador

muestra el contenido de asfalto del tratamiento de la superficie a ser del 10 por ciento.

La gradación de los agregados es como se muestra en la **tabla 4.3**.

Para el ejemplo, la densidad de la capa de superficie de asfalto es 2080 Kg./m³ (130 Lb/pie³)^{*} y la densidad de la piedra de la capa de base es 1760 Kg./m³ (110 Lb/pie³)[^].

* Rango normal 2080 2480 Kg/m³ (130 - 155 Lb/pie³) ASTM D 2726, la gravedad específica Bulk de mezclas bituminosas compactadas de superficies saturadas usan los especímenes secos.

^ Rango normal 1600-1760 Kg/m³ (100-110 Lb/pie³) ASTM T 191, la densidad del suelo en el lugar por el método del cono de arena, AASHTO T 205, densidad del suelo en el lugar por el método del globo de caucho, o AASHTO T 238, la densidad de suelo y suelo-agregado en el lugar por el método nuclear.

TABLA 4.3 Gradación de los agregados.

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa	
	Superficie	Base
	Carpeta asfáltica	Piedra triturada
19.0 mm (3/4 in)		100
12.5 mm (1/2 in)	100	90
9.5 mm (3/8 in)	60	70
4.75 mm (No 4in)	10	45
2.36 mm (No 8)	2	25
300 μm (No 50)		9
75 μm (No 200)		6

La proporción de material (por peso) a ser utilizado en una profundidad a reciclar de 125mm (5 pulg.) se calcula como sigue:

(a) Determine la masa en kilogramos por metro cuadrado (lb/pie²) de la capa de asfalto corregido por el asfalto en la base de 25mm (1 pulg.) de profundidad.

$$2080 - (0.10 \times 2080) = 1872/40^* = 46.8 \text{ kg/m}^2/25\text{mm}$$

$$[130 - (0.10 \times 130) = 117/12^{\wedge} = 9.75 \text{ lb/pie}^2/\text{pulg.}]$$

* 1 mt = 1000 mm ^12 pulg. = 1 pie
1000/25 = 40

(b) La capa de la base es de piedra de 25mm (1 pulg.) de profundidad.

$$1760/40 = 44.0 \text{ kg/m}^2/25\text{mm}$$

$$[110/12 = 9.17 \text{ lb/pie}^2/\text{pulg.}]$$

(c) Para la profundidad de reciclaje – 125mm (5 pulg.)

$$25\text{mm capa de superficie de asfalto} = (25/25) (46.8) = 46.8 \text{ Kg.}$$

$$100\text{mm la capa baja de piedra} = (100/25) (44.0) = \underline{176.0}$$

222.8 Kg.

$$1 \text{ pulg. capa de superficie de asfalto} = 1 \times 9.75 = 9.75 \text{ lbs.}$$

$$4 \text{ pulg. la capa baja de piedra} = 4 \times 9.17 = \underline{36.68}$$

46.43 lbs.

(d) Proporción para la mezclar de agregados.

$$\text{Capa de superficie de asfalto} = 46.8/222.8 = \mathbf{0.21}$$

$$[9.75/46.43 = 0.21]$$

$$\text{La capa baja de piedra} = 176.0/222.8 = \mathbf{0.79}$$

$$[36.68/46.43 = 0.79]$$

Paso 1: Combinación de los agregados en la mezcla reciclada.

Tamaño de la malla	Superficie	Base	Mezcla reciclada
	Carpeta asfáltica	Piedra triturada	
	+	+	=
19.0 mm (3/4 in)	100x0.21=21.0	100x0.79=79.0	100.0
12.5 mm (1/2 in)	100x0.21=21.0	90x0.79=71.1	92.1
9.5 mm (3/8 in)	60 x0.21=12.6	70x0.79=53.3	67.9
4.75 mm (No 4)	10 x0.21=2.1	45 x0.79=35.6	37.7
2.36 mm (No 8)	2 x0.21=0.4	25 x0.79=19.8	20.2
300 μm (No 50)	0 x0.21=0.0	9 x0.79=7.1	7.1
75 μm (No 200)	0 x0.21=0.0	6 x0.79=4.7	4.7

Paso 2: Selección de la calidad del nuevo asfalto.

Esta mezcla (paso 1) reúne los requisitos de la gradación D, de la tabla 2.

Una calidad de emulsión asfáltica SS-1 se selecciona para este diseño en base a la gradación D.

Paso 3: Demanda del porcentaje de asfalto de la combinación de agregados.

Estime el asfalto requerido para la mezcla de agregados, usando la fórmula:

$$P_c = \frac{0.035 a + 0.045 b + 0.20 c + F}{R}$$

$$P_c = \frac{0.035 (79.8) + 0.045 (15.5) + 0.20 (4.7) + 0.7}{0.60}$$

$P_c = 8.55$ porcentaje por peso de la mezcla total.

Paso 4: Porcentaje de Nuevo Asfalto en la Mezcla.

$$P_r = P_c - \frac{(P_a \times P_p)}{R}$$

$$= 8.55 - \frac{(10.0 \times 0.21)}{0.60}$$

$= 5.05$ diga **5.1** por ciento de nuevo asfalto en la mezcla.

$$(o P_d = \frac{100P_r}{100 - P_r} = \frac{100(5.1)}{100 - 5.1} = \mathbf{5.4} \text{ por ciento de nuevo asfalto por peso de agregado }).$$

Paso 5: Ensayos a la mezcla de campo.

Por consiguiente, 5.1 por ciento (5.4 por ciento por peso de agregado) de emulsión asfáltica SS-1 es usado para el valor inicial de la mezcla reciclada en frío en el lugar y está sujeto al ajuste si necesita después de que empiece la construcción.

4.4.5 Evaluación de materiales para la mezcla en caliente¹⁹

4.4.5.1 Alcance.

La mezcla de reciclado en caliente, es una mezcla de recuperación y de nuevos materiales, formulados para lograr una mezcla adecuada y pavimentar con propiedades físicas especificadas. El primer paso es *la evaluación de materiales*, seguido por *el diseño de mezcla* (por el método de Marshall o Hveem). Todos los materiales deben probarse y deben evaluarse para encontrar la mezcla óptima que reúna los requerimientos de la mezcla. A ese fin, este capítulo discute procedimientos y pruebas para reciclar un pavimento en caliente y a los nuevos materiales cuando sean necesarios.

4.4.5.2 Pruebas.

Se han desarrollado varios métodos por obtener muestras representativas de materiales. Entre ellos los métodos para probar asfalto como en el Manual del Instituto del Asfalto serie No. 18; Probando Productos del Asfalto para Complacer las Especificaciones de La Asociación Americana para la Prueba de Materiales (ASTM D 140), o La Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO T 40); agregados, ASTM D 75 (AASHTO T 2), y la mezcla de pavimento asfáltico ASTM D 979 (AASHTO T 168). Sin embargo, sin tener en cuenta el método usado, es requerido juzgarlo en la ingeniería desarrollando un plan de prueba.

La técnica conocida es una prueba al azar y es todavía una de las mejores inventadas. Con esto la localización de la prueba es seleccionada de tal manera que todas las localizaciones posibles dentro de la selección sean igualmente probables para ser

¹⁹ Manual del Instituto del Asfalto MS-20

escogidos y que sean investigados. La opción es imparcial porque se hace completamente por casualidad, usando una mesa de números al azar.

Una ventaja agregada de usar la prueba al azar es que el procedimiento, es basado en métodos estadísticos, y es que ambos la cantidad de trabajo y el costo probablemente involucrado puede reducirse.

El procedimiento para probar al azar los materiales para pavimentos esta detallado en el Manual de Suelos del Instituto del Asfalto MS-10 o ASTM D 3665, puede usarse para seleccionar las localizaciones de prueba.

El aplastar o moler el pavimento asfáltico a reciclar pueden alterar la gradación de la porción de agregados. Por consiguiente, las muestras sometidas a pruebas deben representar la fría alimentación de las pilas de acopio en el sitio de la planta (para reciclaje en planta) y los laboratorios de campo (para reciclaje in-situ). La reserva existente de pruebas puede describirse en el método de AASHTO T-2.

4.4.5.3 El pavimento asfáltico a reciclar.

El diseñar mezclando el pavimento asfáltico conteniendo pavimento asfáltico reciclado requiere ciertas pruebas de laboratorio además de los procesos usuales de Marshall o Hveem.

Primero, la composición del pavimento asfáltico reciclado debe determinarse. Esto incluirá:

- a) Gradación del agregado,
- b) Contenido de asfalto,
- c) Viscosidad del asfalto a 60 °C (140 °F).

Entonces, la gradación de los agregados del material reciclado, cualquiera que sea, debe determinarse. Esta información es usada para definir la cantidad de cemento asfáltico nuevo que se necesita, y la gradación y cantidad adicional de agregados.

Los agregados y el asfalto en el pavimento asfáltico reciclado tienen propiedades que deben ser evaluados por separado. Por consiguiente, es necesario extraer el asfalto viejo de una muestra representativa del pavimento asfáltico reciclado.

- a) *Evaluación del Agregado.* Un análisis por tamices, ASTM C 117 y C 136 (AASHTO T 11 y T 27), se realiza en la porción de agregado de la muestra del pavimento asfáltico reciclado para determinar la gradación (figura 4.5). Cualquier deficiencia puede ser corregida por una mezcla apropiada de fragmentos en el tamiz del nuevo y/o agregado recuperado del pavimento asfáltico reciclado.



Figura 4.5. Muestra desmenuzada de agregados extraídos de un pavimento a reciclar.

Como se observa primero se extraen muestras de la carpeta asfáltica que va a reciclarse, se desmenuza y se coloca en recipientes debidamente identificadas, para luego proceder a separar los agregados del asfalto (figura 4.6).



Figura 4.6. Muestra separada del asfalto, es a la que se toma la granulometría.

- b) *Extracción.* El método que debe ser usado está en ASTM D 2172 (AASHTO T 164). El propósito de la extracción es la separación cuantitativa del agregado y asfalto. Dicha extracción se realiza utilizando los siguientes aparatos:



Figura 4.7. Extractores Centrífugos, separa los agregados del asfalto con solvente tricloroetileno. Marca: Soiltest, Inc. (izquierda) y Freesia Macross (derecha).

Se procede a extraer el asfalto para tener únicamente los agregados. Este proceso se realiza con los extractores que se muestran en la figura 4.7 y figura 4.8 la velocidad máxima a la que giran estos extractores es a 3600 revoluciones/por minuto.

El objeto de las pruebas de extracción del asfalto es conocer si necesita material virgen y rejuvenecedor, además en que cantidades se le van a colocar.



Figura 4.8 Aparato centrífugo, separa los agregados finos del asfalto-solvente.
Marca: Fressia Macross

Después se procede a extraer los finos que pudieron quedar en la mezcla asfalto-solvente, para ser adicionados a los agregados antes extraídos y que así pueda tomarse una granulometría correcta de la carpeta asfáltica.



Figura 4.9. Equipo para extracción del asfalto, es decir separa el asfalto del solvente.
Marca: Fressia Macross

En la figura 4.9 se muestra el equipo con el cual se separa el asfalto del solvente, ya que se necesita solo el asfalto para sacarle otras pruebas.

- c) *Evaluación de Asfalto.* El contenido de asfalto en el pavimento asfáltico reciclado es determinado basándose en los pesos relativos del asfalto extraído y del agregado. La extracción del asfalto recuperado es sobre la base de la solución ASTM D 1856 (AASHTO T 170). Su consistencia es entonces determinada en base a la viscosidad a 60 °C (140 °F), ASTM D 2171 (AASHTO T 202). Esta determinación es necesaria para estimar la cantidad requerida y el grado de asfalto a ser usada en la mezcla designada a reciclar (ver figuras 4.10 y 4.11).

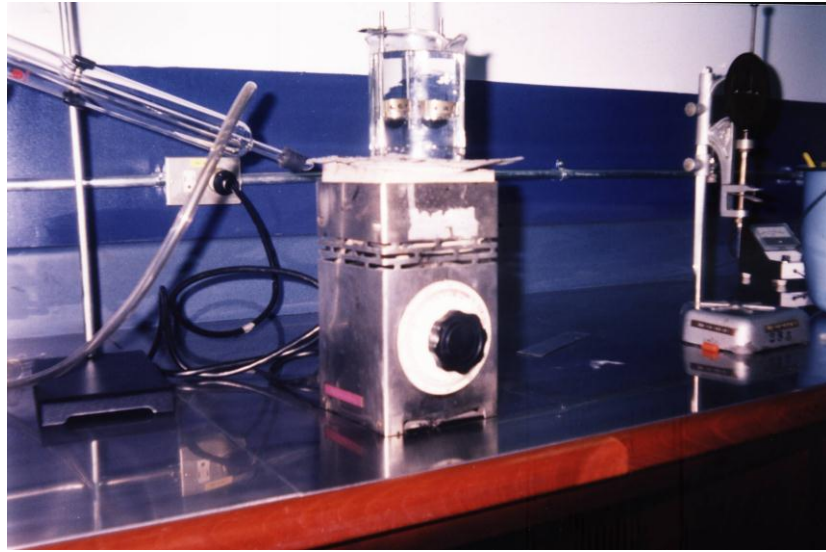


Figura 4.10 Equipo para determinar el Punto de Reblandecimiento del Asfalto.
Marca: Soiltest, Inc.

Esta prueba puede realizarse usando agua o glicerina, dependiendo de la temperatura a la que falle, la prueba dura más o menos 5 minutos. Esta normada por ASTM D 36.



Figura 4.11. Equipo para determinar la Penetración del Asfalto. Normada por ASTM D 5
Marca: Soiltest, Inc.

Esta prueba consiste en penetrar una aguja en una muestra de asfalto que tiene 25°C de temperatura por 5 segundos y luego en la escala de arriba nos indica cuanto fue la penetración, esta por lo general anda en un rango de 60-70 centésimas de milímetros, para un asfalto virgen, para un asfalto que va a ser reciclado anda en un rango mucho menor por lo que así se sabe si necesita asfalto virgen y en que cantidad.

Nota: Se sugiere que cuando no se utilice más de un 20 por ciento del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en la mezcla; la viscosidad del asfalto extraído no es necesaria. La calidad de asfalto a ser usado en la mezcla reciclada normalmente será de la misma calidad usada para las mezclas convencionales.

4.4.5.4 Asfalto nuevo.

Cemento asfáltico nuevo, adicionado a la mezcla del pavimento asfáltico reciclado y el nuevo agregado, sirve para dos propósitos. Para incrementar el contenido de asfalto total para reunir los requisitos de la mezcla; y mezclar con el asfalto viejo en la porción reciclada de la mezcla y rendir así un asfalto que se encuentre en las especificaciones deseadas. Generalmente, se usan cementos asfálticos AC-10, AC-5 o AC-2.5 (AR-4000, AR-2000 o AR-1000; 85-100, 120-150 o 200-300 en penetración.) para este propósito. Estos asfaltos deben encontrarse en las especificaciones normales, ASTM D 3381 o D 946 (AASHTO M 226 o M20).

4.4.5.5 Agentes de reciclaje.

Los agentes de reciclaje son materiales orgánicos con características químicas y físicas seleccionados para restaurar asfaltos viejos y llevarlos a las especificaciones deseadas.

Seleccionar al agente de reciclado, las características de viscosidad del asfalto viejo combinado con el agente de reciclaje son los factores a determinar.

Se han usado varios agentes reciclando con éxito en el plan de mezclas recicladas, aunque no hay actualmente ninguna especificación estándar nacional Americana para estos materiales. En 1976, en una Conferencia de la Costa Pacífica de Usuarios y Productores del Asfalto, se estableció un comité de Productores del Asfalto y Agencias Del Usuario para desarrollar especificaciones funcionales para agentes de reciclaje, y en 1979 el mismo grupo adoptó un juego de especificaciones provisionales para este propósito. Estas características técnicas provisionales se sometieron a ASTM para consideración en el desarrollo de normas para estos materiales. Estos propusieron especificaciones del agente de reciclaje y se publicó en los 1980 Procedimientos de la Asociación de Tecnólogos en Pavimentos de Asfalto (volumen 49).

(Consulte con el fabricante para la selección de un agente de reciclaje).

4.4.5.6 Agregado sin tratar.

Cualquier agregado normalmente usado para concreto asfáltico, material agregado de un reciclaje, o ambos pueden ser adicionados a un pavimento de asfalto reciclado para producir una mezcla con la gradación deseada. Pruebas preliminares de la combinación de agregados son necesarias para determinar la cantidad correcta de cada uno a ser usado

en la mezcla reciclada. Al seleccionar el nuevo o al agregado recuperado, se debe considerar si la mezcla será usada como una base asfalto-concreto o superficie de curso. La mezcla debe tener la gradación deseada y debe encontrarse el criterio del procedimiento para diseñar y la selección estructural del pavimento. También debe tener bastante trabajabilidad para permitir su colocación apropiada.

4.4.5.7 Combinación de agregados.

A la mezcla de reciclado y a los nuevos agregados se les debe encontrar el criterio de la gradación especificada, como es una de las gradaciones de la mezcla descrita en la publicación del Instituto del Asfalto, ejemplares de especificaciones de la construcción para el concreto asfáltico y otros tipos de mezcla en Planta (SS-1).

Alternativamente, ASTM especificación D 3515 establece el estado o el criterio local que puede usarse para determinar la gradación y los requisitos de calidad de los agregados combinados.

Además, la mezcla de agregados debe verificarse por resistencia a despojar. Usando una prueba de sensibilidad de agua aceptada y el mismo asfalto escogido para el proyecto, determina si necesita un relleno mineral o un agente.

La prueba de inmersión a compresión, “*el efecto del agua en la cohesión de mezclas bituminosas compactadas*”, ASTM D 1075 (AASHTO T 165), se recomienda para mezclas compactadas que contienen cemento asfáltico. La fuerza retenida debe exceder el 75 por ciento. También vea *La Causa y Prevención al Desalojar un Pavimento Asfáltico* (ES-10), de El Instituto del Asfalto.

4.4.6 Diseño de mezcla de reciclado en caliente

4.4.6.1 Alcance.

En esta sección se presenta paso a paso el proceso necesario para proporcionar los materiales reciclados, selección de la calidad y cantidad de cemento asfáltico (más agente de reciclaje, si necesita) y prepara un plan final para la mezcla reciclada. Este es el método de la mezcla en caliente a reciclar, usando de 10 a un 70 por ciento del pavimento asfáltico reciclado. El lote de plantas que puede manejar un 50 por ciento (sin algún método auxiliar de precalentar el pavimento asfáltico recuperado, RAP), con el rango más práctico siendo de 10 a 35 por ciento; las plantas de mezcla de tambor pueden manejar un 70 por ciento, con 10 a 50 por ciento que es un rango práctico.

4.4.6.2 Pasos de preparación.

Este procedimiento de diseño de mezcla usa el método de Marshall o el de Hveem como sigue: El agregado para un pavimento asfáltico es mezclado con materiales agregados de reciclado y/o nuevo, los cuales son requeridos para obtener una combinación de agregados encontrándose así la gradación en las especificaciones requeridas. Una vez las proporciones relativas de agregados son determinadas, una demanda total del asfalto se calcula. Un grado de asfalto nuevo es entonces seleccionado (mas agente de reciclaje, si es necesario) para restaurar el asfalto viejo y proporcionar una carpeta final que reúna los requisitos funcionales de las especificaciones del asfalto, entonces satisfacer la demanda de la mezcla del asfalto. Siguiendo estas determinaciones, la mezcla diseñada

por Marshall o el procedimiento de Hveem es realizado y la cantidad exacta de la carpeta total determinada.

4.4.6.3 Diseño de la mezcla.

Con la información obtenida en la *evaluación de los materiales*, el diseño de la mezcla reciclada en caliente puede ser formulado. La viscosidad a 60 °C (140 °F), ASTM D 2171 (AASHTO T 202), es la medida de la prueba usada en este procedimiento para identificar asfalto en el pavimento asfáltico reciclado y en la mezcla reciclada.

Al igual que en el reciclaje en frío el proceso de reciclaje en caliente puede realizarse tanto en planta como in situ y los criterios referentes al diseño de la mezcla reciclada varían un poco uno del otro de acuerdo a lo siguiente:

- Reciclado in situ: Básicamente el diseño de la mezcla reciclada consiste en llevar la granulometría de los materiales de la carpeta asfáltica existente (RAP) dependiendo del espesor a reciclar (5 cm. máximo), a una de las granulometrías especificadas en la tabla 4.2, si es que estos no la cumplen, además se estudia lo que son las propiedades actuales del asfalto existente, la corrección de la granulometría se realiza agregando material nuevo, lo mismo para corregir el asfalto (se agrega rejuvenecedor si es necesario), por lo que los ensayos de laboratorio de muestras representativas del pavimento a reciclar desempeñan un papel sumamente importante para definir la gradación del material existente, el

tipo y cantidad de asfalto mas agente rejuvenecedor a utilizar durante el reciclado in situ.

- Reciclado en planta: En este proceso los materiales son escarificados por medio de una recicladora en frío o un ripper tanto la carpeta asfáltica como de la base granular para ser llevados a una planta en donde se determinan sus granulometrías por separado y fácilmente estos se combinan en porcentajes determinados para hacerlos llegar a la granulometría especificada agregando material nuevo si es necesario, luego se procede a la determinación del tipo y cantidad de asfalto nuevo mas agente rejuvenecedor (si lo necesita) a utilizar en la mezcla reciclada.

En las secciones siguientes se desarrolla un diseño de mezcla para reciclado en planta por ser un tanto mas compleja la combinación de agregados ya que considera la carpeta asfáltica, base granular y agregado nuevo por separado mientras que en el reciclado in situ se recicla lo que es el espesor máximo de 5 cm. de la carpeta asfáltica sin tomar en cuenta la base y se conforma la nueva carpeta asfáltica agregando mezcla virgen y agente rejuvenecedor (cuando esta lo necesite).

La Figura 4.12 es un mapa de flujo para el diseño de la mezcla, los pasos son:

1. *Combinación de los agregados en la mezcla reciclada* usando la gradación de los agregados del pavimento asfáltico recuperado, el agregado material recuperado RAM (sí es una base granular) y el agregado nuevo; una gradación combinada que reúna los requisitos de la especificación deseada se calcula.

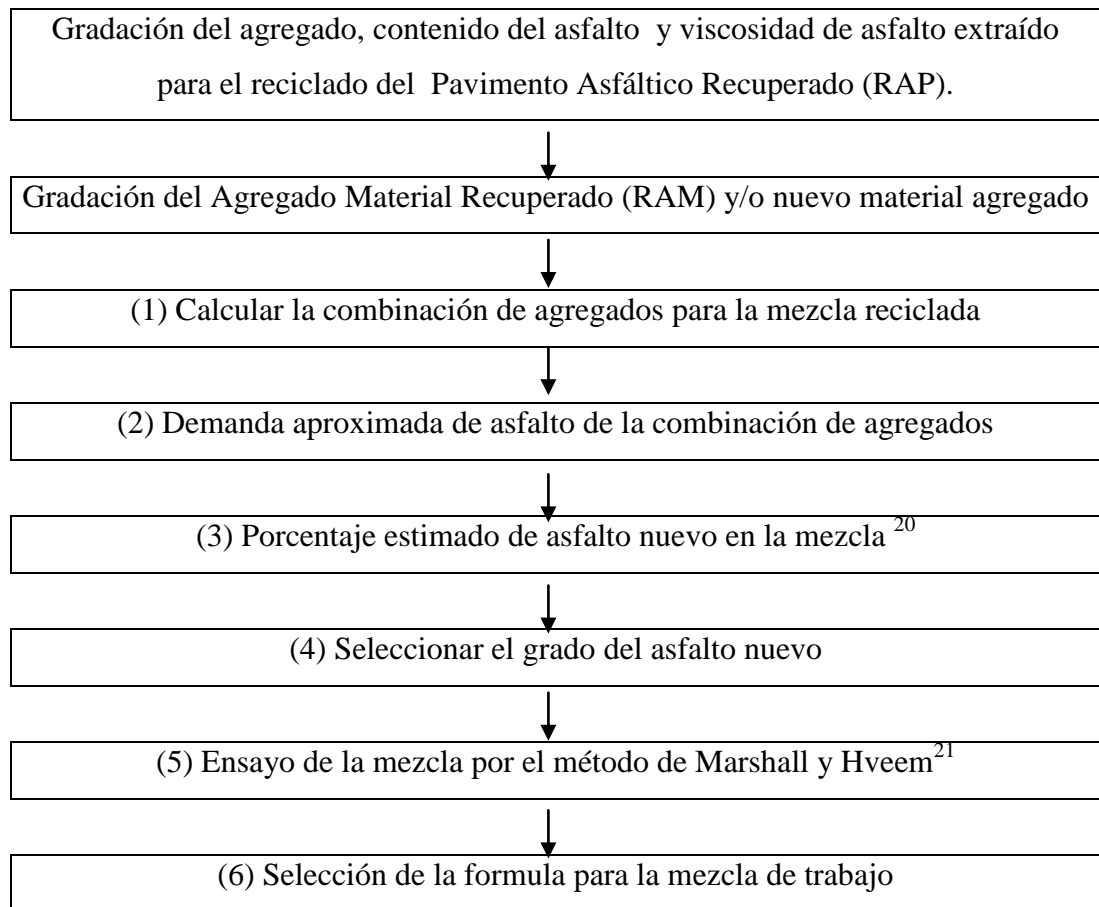


FIGURA 4.12 Mapa de flujo para el diseño de mezcla.

²⁰ En algunos casos puede incorporarse un agente de reciclaje

²¹ Es un método para el diseño de la mezcla en caliente para concreto asfáltico.

TABLA 4.3: FORMULAS PARA EL PROPORCIONAMIENTO DE MATERIALES PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE RECICLADAS.

Donde la combinación de agregados en la mezcla es constante.

	POR CONTENIDO DE ASFALTO	
	Por peso total de la mezcla	Por peso de agregados
% de asfalto nuevo P_{nb}	$\frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$	$P_b - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100}$
% RAP P_{sm}	$\frac{100(100 - r)}{100 - P_{sb}} - \frac{(100 - r)P_b}{100 - P_{sb}}$	$\frac{(100 + P_{sb})(100 - r)}{100}$
% Agreg. nuevo y/o RAM P_{ns}	$r - \frac{rP_b}{100}$	r
Total	100	$100 + P_b$
% Nuevo Asfalto o Contenido de Asfalto Total, R	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$

P_{sm} = Porcentaje de mezcla recuperada (RAP) en la mezcla reciclada.

P_b = Contenido de asfalto de la mezcla reciclada, %

P_{sb} = Contenido de asfalto de la mezcla recuperada (RAP), %

P_{nb} = Asfalto adicional y/o agente de reciclaje en la mezcla reciclada, %

P_{ns} = Porcentaje de agregado adicional (nuevo o agregado de material reciclado)

r = Nuevo porcentaje y/o agregado de material reciclado para agregar al total de la mezcla reciclada

R = Porcentaje de asfalto Nuevo y/o agente de reciclaje en el asfalto total en la mezcla reciclada.

Después de la curvatura de agregado (agregado en el pavimento asfáltico reciclado RAP, agregados nuevos y/o agregado material recuperado (RAM), cuando se trata de una base granular) se ha establecido la cantidad de nuevo agregado y se expresa como r, en porcentaje.

Por ejemplo, suponga que la mezcla siguiente se estableció para una mezcla reciclada.

60%	Agregado reciclado (RAM) (base granular)
15%	Agregado nuevo
25%	RAP agregado
<hr/>	
100%	Total

La cantidad de nuevo agregado y RAM es 75%. Entonces, $r = 75$. La tabla 4.3 contiene las fórmulas para el proporcionamiento de los materiales para el reciclado de mezclas asfálticas en caliente, donde el conjunto de agregados en la mezcla se mantiene constante.

2. *Demanda del asfalto aproximado para la combinación de agregados.* La demanda de asfalto aproximado para la combinación de agregados puede ser determinada por la prueba Equivalente Centrífuga del Querosén (ASTM D 5148), prueba incluida en el Instituto del Asfalto por el Método de Hveem para diseñar la mezcla, o calculada por la fórmula empírica siguiente:

$$P = 0.035a + 0.045b + Kc + F$$

Donde:

P = Demanda total de asfalto aproximado de mezcla reciclada, porcentaje por peso de mezcla.

a = Porcentaje* de agregado mineral retenido en la malla de 2.36 mm (N° 8).

b = Porcentaje* de agregado mineral que pasa la malla 2.36 mm (N° 8) y retenida en la malla de 75 μm (N° 200).

* Expresado en número entero

c = Porcentaje de agregado mineral que pasa la malla de 75 μm (N° 200).

K = 0.15 para 11-15 por ciento que pasa la malla de 75 μm (N° 200).

0.18 para 6-10 por ciento que pasa la malla de 75 μm (N° 200).

0.20 para el 5 por ciento o menos que pasen la malla de 75 μm (N° 200).

F = 0 a 2.0 por ciento. Basado en la absorción del agregado, en la ausencia de otros datos, un valor que se sugiere es 0.7.

Con una demanda de asfalto aproximada establecida, esto mantendrá una base para una serie de ensayos para el diseño de la mezcla. Las mezclas de ensayo variarán en volúmenes de asfalto en 0.5 incrementos en cualquier lado de la demanda de asfalto aproximada calculada.

Por ejemplo, suponga que la demanda de asfalto aproximada esta calculada para un 6.2 %. Una serie de mezclas de ensayo podría ir entonces de 5.0 a 7.0 por ciento o de 5.5 a 7.5 por ciento.

3- *Porcentaje estimado de nuevo asfalto en mezclas.* La cantidad de nuevo asfalto a ser adicionado a las mezclas del ensayo para la mezcla reciclada, expresado como porcentaje del peso total de la mezcla es calculado por la fórmula siguiente:

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$

Donde:

P_{nb} = Porcentaje*, contenido de asfalto de la mezcla reciclada (aproximado)

r = Demanda de asfalto por CKE o la fórmula empírica en el ítem 2

P_b = Porcentaje*, contenido de asfalto o demanda de asfalto del pavimento asfáltico reciclado, determinado por CKE o la fórmula empírica en el ítem 2,

P_{sb} = Porcentaje*, contenido de asfalto del pavimento asfáltico reciclado.

* Expresado en un número entero.

Por ejemplo, suponga que el contenido de asfalto, P_{sb} del RAP es 4.7 por ciento y $r = 75\%$, entonces:

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - 75 \times 4.7)P_b}{100(100 - 4.7)} - \frac{(100 - 75)4.7}{100 - 4.7} = 1.01 P_b - 1.23$$

Los porcentajes de nuevo asfalto para cualquier contenido de asfalto pueden ahora determinarse rápidamente.

Nota: La fórmula anterior es para expresar el contenido de asfalto como porcentaje por peso total de la mezcla. Sí el contenido de asfalto esta expresado como porcentaje por peso de agregado, la fórmula para calcular la cantidad de nuevo asfalto es:

$$P_{nb} = P_b - \frac{(100-r)P_{sb}}{100} \quad (\text{ver la TABLA 4.3})$$

4- *Selección de la calidad del nuevo asfalto.* Usando la figura 4.13, una viscosidad designada de la mezcla de asfalto se selecciona. Un punto designado normalmente seleccionado es la viscosidad en el medio-rango de un asfalto AC -20" o 2000 poises.

El porcentaje del nuevo asfalto, P_{nb} , al contenido total de asfalto, P_b , es expresado por la siguiente formula:

$$R = \frac{100P_{nb}}{P_b}$$

Por ejemplo, suponga la mezcla descrita en el paso **3** es para tener un contenido de asfalto estimado de 6.2 %. La cantidad de nuevo asfalto a ser agregado (de paso **3**) es:

$$P_{nb} = 1.01 \times 6.2 - 1.23 = 5.0 \%$$

Entonces;

$$R = \frac{100(5.0)}{6.2} = 81$$

" Las relaciones entre varios sistemas graduados para cemento asfáltico se muestran en la Figura 4.15.

La calidad del nuevo asfalto (y/o agente de reciclaje) es determinado usando un log-log de viscosidad versus la carta del porcentaje de nuevo asfalto mezclado como lo muestra la figura 4.13. Por lo tanto una carta de viscosidad para preparar la mezcla asfáltica recuperada y el nuevo asfalto (y/o un agente de reciclaje) debe ser seleccionada. La carta de viscosidad usada es normalmente viscosidad de medio-rango del grado de asfalto normalmente utilizado dependiendo del tipo de construcción, condiciones climáticas, la cantidad y naturaleza de tráfico.

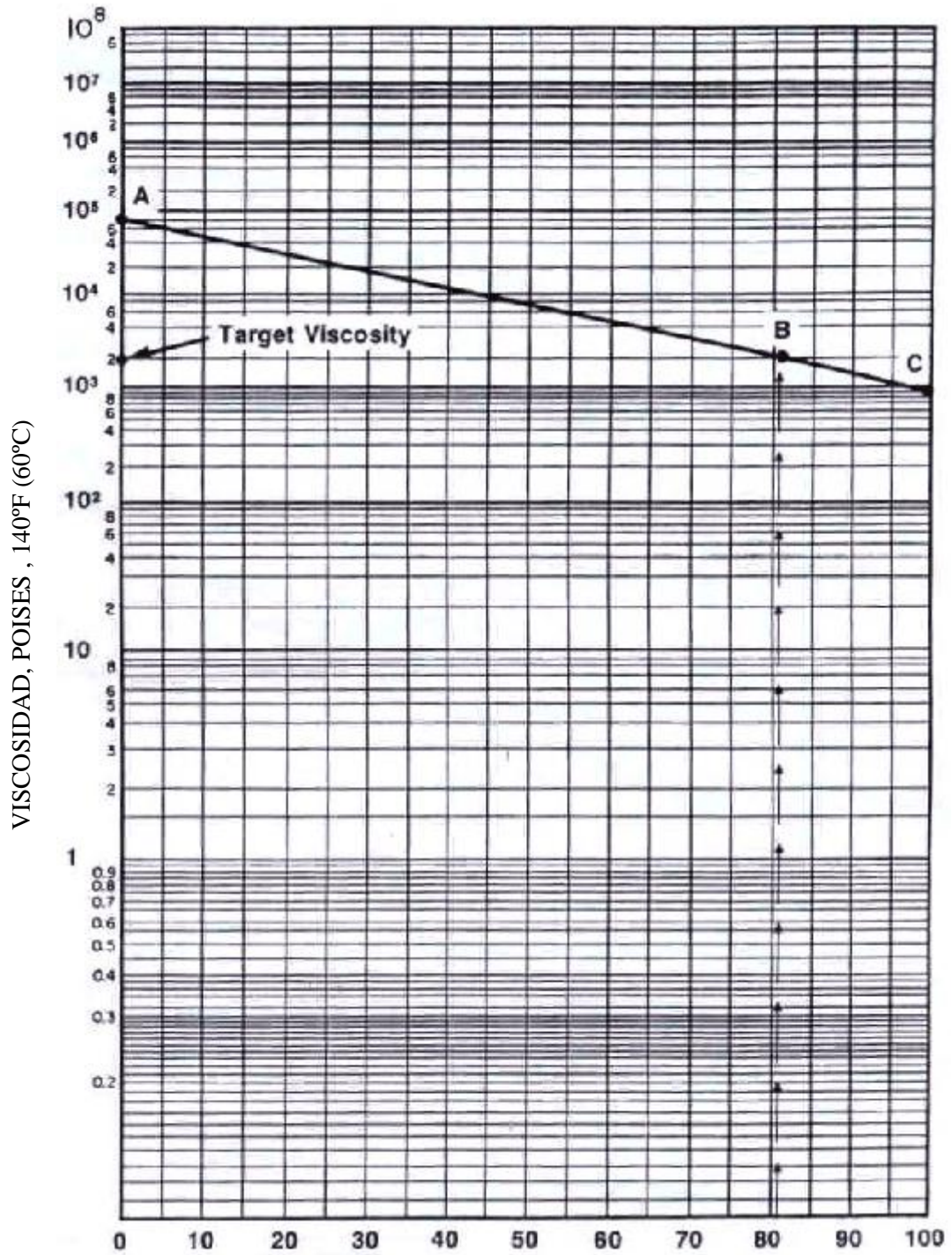
Trace la viscosidad del asfalto viejo del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en el lado izquierdo de la escala vertical, punto **A**, como se ilustra en la figura 4.13, Dibuje una línea vertical que representa el porcentaje de nuevo asfalto, **R**, calculado lo anterior se determina su intersección con la línea horizontal que representa la viscosidad de diseño de la carta, punto **B**.

Luego se traza una línea recta del punto **A** hasta el punto **B** y lo extiende para cortar el límite derecho, punto **C**.

El punto **C** es la viscosidad a 60°C (140°F) del nuevo asfalto (y/o agente de reciclaje) requerido para mezclarlo con el asfalto obtenido del pavimento asfáltico recuperado y así obtener la viscosidad de la mezcla preparada. Se debe seleccionar la calidad del nuevo asfalto que este incluido en un rango de viscosidad o lo más cercano a la viscosidad del punto **C**.

Para trazar un punto usando la escala vertical, considere la viscosidad utilizando potencias de 10. Por ejemplo, 75000 poises, sería 7.5×10^4 , para trazar el punto en la escala vertical, se interpolaría 7.5 en la escala entre 10^4 y 10^5 .

Figura 4.13. CARTA DE VISCOSIDAD DEL ASFALTO PARA MEZCLA



ASFALTO NUEVO O AGENTE DE RECICLAJE EN LA MEZCLA, R, PORCENTAJE POR PESO

Nota: se sugiere que al seleccionar una calidad de cemento asfáltico por reciclar que la guía siguiente sea usada:

20% el RAP = no cambia mas de un grado en calidad del asfalto

21% RAP o más = no cambia más de una calidad

(Para AC-20 a AC-10)

5- *Ensayo de la mezcla diseñada.* Se hacen ensayos de la mezcla diseñada usando a Marshall o el aparato de Hveem. Se usan las fórmulas mostradas en la tabla 4.3 para proporcionar los ingredientes: nuevo asfalto, P_{nb} , pavimento asfáltico reciclado (RAP), P_{sm} y nuevo agregado y/o agregado reciclado (RAM), P_{ns} .

Teniendo presente que si se utilizan dos fuentes de agregados diferentes, como nuevo agregado y RAM, deben determinarse los porcentajes de cada una de estas fuentes y el total equivalente. Por ejemplo la mezcla de agregado consiste en:

60% RAM (material de una base granular)

15% Nuevo agregado

25% RAP agregado

$r = 75$

Si P_{ns} en una mezcla de ensayo es 61.4 por ciento, entonces el porcentaje de RAM (material de una base granular) en la mezcla total es $61.4 \times (60/75) = 49.1\%$ y el porcentaje de agregado nuevo será $61.4 \times (15/75) = 12.3$, siendo el total igual a 61.4%

6- *Selección de la fórmula de la mezcla de trabajo.*

4.4.6.4 Ejemplo del diseño²²

El pavimento asfáltico reciclado tiene un contenido de asfalto de 5.4% por peso total de la mezcla. La viscosidad del asfalto recuperado del pavimento asfáltico reciclado es de 46,000 poises a 60°C (140°F). El grado de cemento asfáltico normalmente usada es AC-20, y la viscosidad de diseño a una temperatura de 60°C (140°F) es 2,000 poises. La gradación del RAP, RAM y el nuevo agregado es:

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa		
	RAP AG.	RAM	NUEVO AG.
25.0 mm (1 pulg)	100	100	100
19.0 mm (3/4 pulg)	98	92	100
9.5 mm (3/8)	85	45	100
4.75 mm (No 4)	65	19	94
2.36 mm (No 8)	52	5	85
300 µm (No 50)	22	1	26
75 µm (No 200)	8	0	6

Aproximadamente 30% de RAP (pavimento asfáltico recuperado) se seleccionó porque (1) una planta del lote sería utilizada para reciclar, (2) el contenido de humedad del RAP tenía el 5% y (3) éste es un rango práctico para mantener producciones de la mezcla.

²² El ejemplo es de un reciclado en caliente en planta, por considerarse más ilustrativo este ejemplo.

PASO 1- *Combinación de agregados en la mezcla reciclada*

	30%	60%	10%	Combinación
	RAP Agreg.	RAM Agreg.	Agreg. nuevo	de agregados
Tamaño	% que pasa	% que pasa	% que pasa	% que pasa
25.0 mm (1 pulg.)	100x0.3=30	100x0.6=60.0	100x0.1=10.0	100.0
19.0 mm (3/4 pulg)	98 x0.3=29.4	92 x0.6=55.2	100 x0.1=10.0	94.6
9.5 mm (3/8 pulg)	85 x0.3=25.5	45 x0.6=27.0	100 x0.1=10.0	62.5
4.75 mm (No 4)	65 x0.3=19.5	19 x0.6=11.4	94 x0.1=9.4	40.6
2.36 mm (No 8)	52 x0.3=15.6	5 x0.6=3.0	85 x0.1=8.5	27.1
300 μm (No 50)	22 x0.3=6.6	1 x0.6=0.6	26 x0.1=2.6	9.8
75 μm (No 200)	8 x0.3=2.4	0 x0.6=0	6 x0.1=0.6	3.0

Entonces: $r = 60 + 10 = 70$

Especificación de trabajo
ASTM D 3515, tabla siguiente.
¾ pulg. (19 mm) Nominal

Tamaño de la malla	Tamaño Máximo % que pasa	Combinado de agregado % que pasa
25.0 mm (1 pulg.)	100	100.0
19.0 mm (3/4 pulg)	90-100	94.6
9.5 mm (3/8 pulg)	56-80	62.5
4.75 mm (No 4)	35-65	40.6
2.36 mm (No 8)	23-49	27.1
300 μm (No 50)	5-19	9.8
75 μm (No 200)	2-8	3.0

PASO 2- Demanda del asfalto aproximada para la combinación de agregados

$$P = 0.035 a + 0.045 b + K c + F$$
$$= 0.035 \times 72.9 + 0.045 \times 24.1 + 0.20 \times 3.0 + 1.0 = 5.2 \text{ por ciento}$$

PASO 3- Porcentaje estimado de nuevo asfalto en mezclas

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - P_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$
$$= \frac{(100^2 - 5.4 \times 70)P_b}{100(100 - 5.4)} - \frac{(100 - 70)5.4}{100 - 5.4} = 1.02 P_b - 1.71$$

Para una demanda aproximada de asfalto de 5.2 por ciento;

$$P_{nb} = 1.02 (5.2) - 1.71 = 3.6 \text{ por ciento}$$

El porcentaje de nuevo asfalto, P_{nb} , a total de asfalto, P_b , sea entonces;

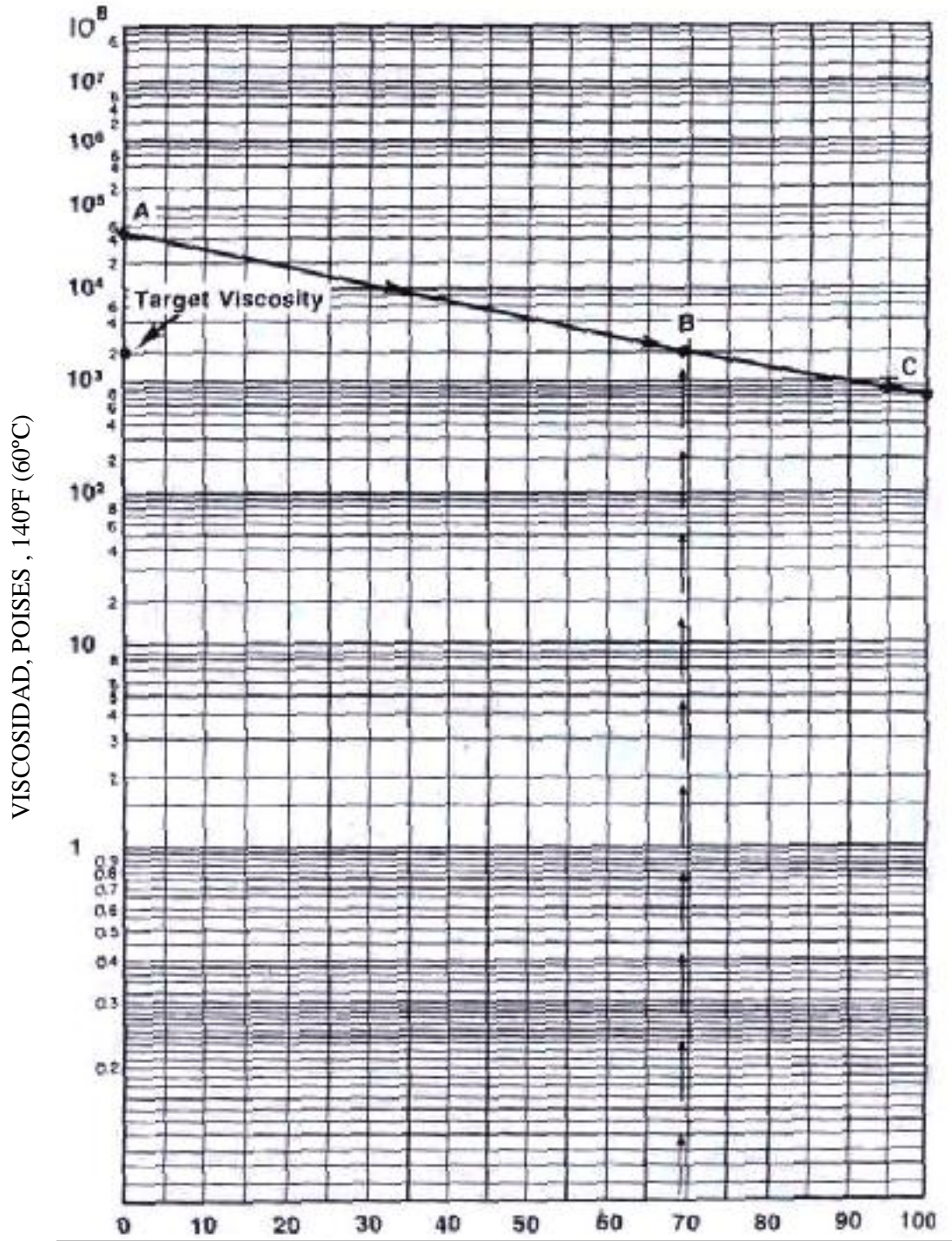
$$R = \frac{100(3.6)}{5.2} = 69 \text{ por ciento.}$$

PASO 4- Selección de la calidad del nuevo asfalto.

En la figura 4.14, El punto **A** es la viscosidad del viejo asfalto a 46,000 poises (4.6×10^4). El punto **B** esta localizado en la carta de viscosidad a 2,000 poises (2.0×10^3) y **R** = 69. La línea de proyección del punto **A** a través del punto **B** al punto **C** indicando que la viscosidad del nuevo asfalto es 7.0×10^2 poises (700).

Subsecuentemente AC-20 es el grado normal del cemento asfáltico usado en el área de construcción, clima y tráfico, AC-10 se escogerá para este proyecto. El AC-10 cuando se mezcla con el asfalto viejo en el RAP debe producir un AC-20 dentro de tolerancias aceptables.

Figura 4.14. CARTA DE VISCOSIDAD DEL ASFALTO PARA MEZCLA



ASFALTO NUEVO O AGENTE DE RECICLAJE EN LA MEZCLA, R, PORCENTAJE POR PESO

PASO 5- *Ensayo de la mezcla diseñada.*

Usando la mezcla de agregado al 60 por ciento RAM, 10 por ciento de nuevo agregado y 30 por ciento de agregado RAP, el ensayo de mezclas de diferentes contenidos de asfalto (variando en 0.5 por ciento incrementando) se prepara según lo estándar de Marshall o Hveem procedimientos de la mezcla diseñada.

Las fórmulas en la Tabla 4.3 pueden usarse para determinar los porcentajes de cada ingrediente en las mezclas de ensayo. Desde la fórmula para P_{nb} que se calculó en el paso 3, las fórmulas para proporcionar el P_{sm} y P_{ns} son:

$$P_{sm} = \frac{100(100-r)}{100-P_{sb}} - \frac{(100-r)P_b}{100-P_{sb}} = \frac{100(100-70)}{100-5.4} - \frac{(100-70)P_b}{100-5.4} = 31.71 - 0.32 P_b$$

$$P_{ns} = r - \frac{rP_b}{100} = 70 - \frac{70P_b}{100} = 70 - 0.70 P_b$$

Contenido de asfalto, P_b	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
$P_{nb} = 1.02P_b - 1.71$	2.9	3.4	3.9	4.4	4.9
$P_{sm} = 31.71 - 0.32P_b$	30.3	30.1	29.9	29.8	29.6
$P_{ns} = 70 - 0.70P_b$	66.8	66.5	66.2	65.8	65.5
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
*% RAM = $P_{ns}(60/70)$	57.3	57.0	56.7	56.4	56.1
*% Agreg. Nuevo = $P_{ns}(10/70)$	9.5	9.5	9.5	9.4	9.4

*Los porcentajes de nuevo agregado y RAM es como una mezcla determinada como P_{ns} . Sin embargo, 60 por ciento RAM y 10 por ciento del nuevo agregado será usado en la mezcla agregado. La cantidad de RAM será entonces $P_{ns} \times 60/70$ y el nuevo agregado sea $P_{ns} \times 10/70$.

Cuando se prepara la mezcla en ensayos de laboratorio, se sugiere que el RAP se caliente a una temperatura en la que pueda mezclarse y mantenerlo a esa temperatura. El nuevo agregado y RAM son normalmente calentados a 10 °C (50 °F) y mezclados a la temperatura anterior. Cuando el agregado y RAP han sido pesados fuera, deben empezar mezclando en seco los materiales completamente antes de agregar nuevo asfalto. Guardando que el RAP no se exponga a temperaturas elevadas, éste debe sostenerse a un mínimo. Por otra parte, se siguen procedimientos de diseño de mezclas normales.

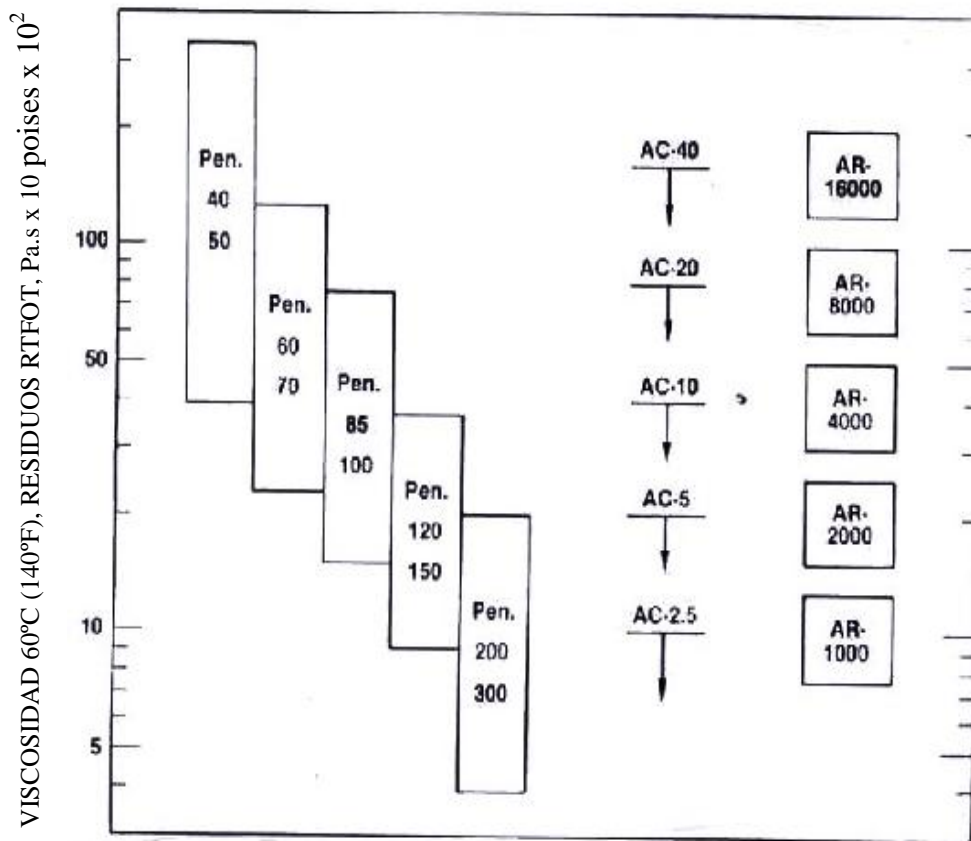


Figura 4.15. Comparación del grado de penetración y grado de viscosidad del cemento asfáltico (basado en RTFOT residuo para grados-AR y grados de penetración; TFOT residuos para grados-AC).

PASO 6- *Selección de la formula de la mezcla de trabajo.*

El contenido óptimo de nuevo asfalto y la mezcla de diseño son determinadas conforme a lo estándar establecido por Marshall o el criterio de diseño de mezclas de Hveem (como se usa para los materiales vírgenes).

CAPITULO V

DISEÑO DEL ESPESOR

DEL PAVIMENTO

RECICLADO EN FRIO

5.0 DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO, RECICLADO EN FRÍO.

5.1 PROPOSITOS DEL PAVIMENTO²³

Debido a su estrecha relación, en este capítulo se combinan la investigación de las carreteras deterioradas y las fases del diseño del pavimento para su rehabilitación.

Siempre hay que tener en cuenta las siguientes reglas:

- Debe entenderse claramente que espera el propietario del pavimento rehabilitado.

Esto significa:

- ¿Requiere un período de diseño a corto o a largo plazo?

- ¿Cuáles estándares se esperan de las propiedades de funcionalidad, tales como el índice de servicio y la resistencia al deslizamiento?

- ¿Qué nivel de recursos se destinará para el mantenimiento rutinario del pavimento en su período de diseño? Por ejemplo, ¿se espera que no haya mantenimiento por un largo tiempo durante dicho período? ¿Cuáles son las capacidades de mantenimiento local, desde el punto de vista de la mano de obra, equipos y conocimientos?

- Debe llevarse a cabo una investigación que permita adquirir un adecuado nivel de entendimiento sobre el comportamiento del pavimento existente. Este requerimiento gobernará en gran medida el tipo y frecuencia de los ensayos necesarios para cada proyecto en particular.

²³ Extraído del manual de reciclaje en frío Wirtgen. 2^{da} edición, Septiembre 2001

El propósito de este estudio es obtener información suficiente para desarrollar un diseño de rehabilitación apropiado. Para un proyecto específico, el tipo y extensión de los trabajos de investigación del pavimento variarán significativamente, según lo que se requiera; por este motivo resulta esencial la interacción entre la investigación y el diseño. Estos diseños pueden realizarse para satisfacer una amplia variedad de carreteras: desde vías en grava pavimentadas, con tráfico liviano, hasta autopistas de múltiples carriles, con tráficos muy pesados. Igualmente, se pueden llenar los requerimientos específicos de los propietarios de la vía en cuanto al período de diseño y los estándares de funcionalidad.

En este capítulo se describen, en detalle, las dos categorías fundamentales del reciclaje en frío y se cubren los métodos de investigación comúnmente usados, aplicables a cada categoría. Así mismo, se emplean diagramas de flujo para ilustrar la metodología requerida para cada categoría; se dispone de varios métodos de diseño de pavimentos, con diferentes niveles de confianza en cuanto a la seguridad del diseño, y se presenta un breve resumen de algunos de los métodos más populares de diseño de pavimentos.

5.2 CATEGORÍAS DE RECICLAJE EN FRÍO²⁴

El reciclaje en frío puede dividirse en tres categorías: reciclaje profundo, reciclaje superficial o de capas delgadas y mejoramiento de vías en grava no pavimentadas.

²⁴ Ibidem

En muchos casos, no existe una diferencia clara entre los dos primeros tipos de reciclaje, y es bastante usual algún traslapo de estos dos enfoques.

5.2.1 Reciclaje profundo

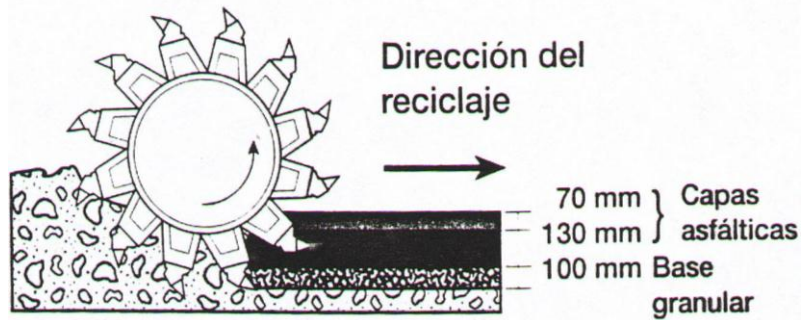
El reciclaje profundo abarca un amplio espectro de aplicaciones y cubre estrategias de diseño a mediano y largo plazos, con el propósito de reforzar el pavimento que está deteriorado. Los revestimientos sobre la superficie de la capa reciclada mejoran las propiedades de funcionalidad, tales como la resistencia al deslizamiento y el índice de servicio. Los espesores típicos del reciclaje profundo superan los 150 mm.

El reciclaje profundo resulta adecuado para reforzar los pavimentos deteriorados que tienen capas asfálticas gruesas o delgadas. En la **Figura 5.1** se indican dos ejemplos de reciclaje profundo. En ambos casos la profundidad de reciclaje es de 300 mm, nótese que la **Fig. 5.1a** tiene una capa asfáltica gruesa mientras que la **Fig. 5.1b** la capa asfáltica es relativamente delgada.

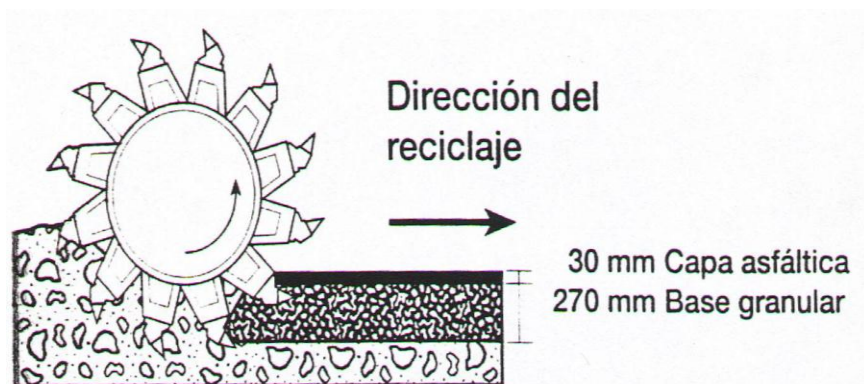
Una vez realizado el reciclaje, se requiere un revestimiento nuevo. Para vías con tráfico liviano, este revestimiento puede ser un sello o una carpeta asfáltica delgada de mezcla en caliente. En las situaciones en las que el pavimento soportará tráfico pesado, puede necesitarse una base asfáltica, así como de una rodadura asfáltica. Con espesores que sean capaces de resistir las cargas vehiculares adecuadamente sin sufrir daños prematuros durante su vida útil.

Fig. 5.1 Reciclaje profundo a 300 mm con diferentes espesores de capa asfáltica

a) Asfalto grueso



b) Asfalto delgado



La metodología para la investigación y diseño del pavimento con reciclaje profundo se describe en el diagrama de flujo de la **Figura 5.2**.

Fig. 5.2 Diagrama de flujo que detalla la metodología de investigación y diseño del pavimento en el caso de un reciclaje profundo.

Pasos

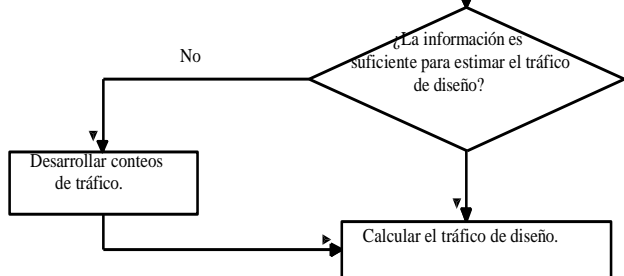
1

Acuerdo con el propietario sobre la vía.
Período de diseño.
Estándares de funcionalidad.
Recursos para el mantenimiento.
Consideraciones prácticas de construcción.

2

Recopilación de la información disponible.
Diseño del pavimento original.
Espesor y calada real de las capas.
Fuentes locales de agregados.
Información sobre el tráfico.

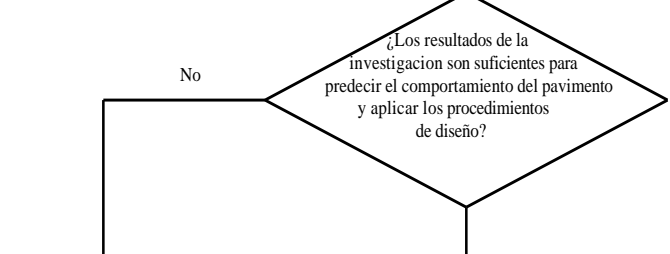
3



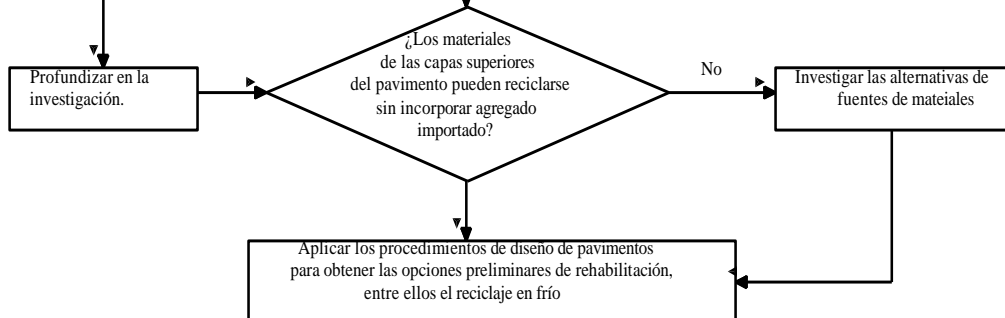
4

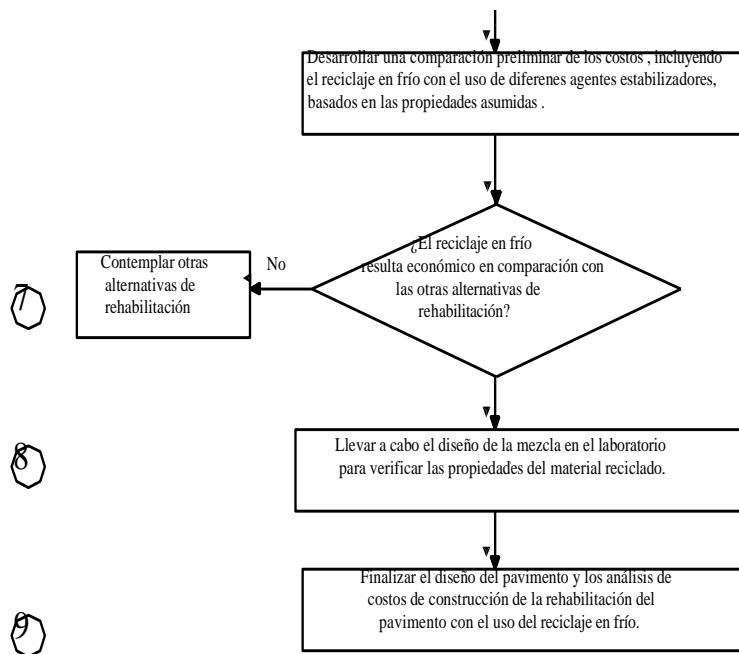
Implementar una investigación apropiada del pavimento.

5



6





5.2.2 Reciclaje superficial o de capas delgadas

El reciclaje superficial se lleva a cabo como un medio para eliminar el agrietamiento severo de las capas asfálticas y, a su vez, mejorar el índice de servicio. Frecuentemente se desarrolla esta categoría de reciclaje como una estrategia a corto plazo, pero también puede usarse en aquellos pavimentos en los que las capas asfálticas superiores son débiles. Los espesores del reciclaje superficial varían entre 80 y 150 mm.

Con el reciclaje superficial, puede existir un ligero mejoramiento de la capacidad estructural del pavimento, debido al efecto del revestimiento asfáltico que normalmente se aplica sobre la capa tratada. La limitación al ingreso de agua a las capas inferiores también tenderá a prolongar la vida del pavimento.

En la **Figura 5.3** se muestra, en un diagrama de flujo, la metodología para la investigación y para el diseño del reciclaje superficial.

Fig 5.3 Diagrama de flujo que detalla la metodología de investigación y diseño de pavimentos para reciclaje superficial.

Pasos

①

Acuerdo co el propietario sobre la vía:
 - Período de diseño (Posiblemente una estrategia de diseño a corto plazo).
 - Estándares de funcionalidad.
 - Consideraciones prácticas de construcción.

②

Recopilación de la información disponible:
 - Diseño del pavimento original.
 - Espesor y calada real de las capas.
 - Fuentes locales de agregados.
 - Información sobre el tráfico.

③

Implementar una investigación apropiada del pavimento

④

¿Los resultados de la investigación son suficientes para evaluar diferentes alternativas

No

Profundizar en la investigación

Realizar comparación de costo para:
 - Sobrecarpas asfálticas
 - Fresado y reemplazo
 - Reciclaje en frío

⑤

Contemplar otras alternativas de rehabilitación

No

¿el reciclaje en frío resulta económico en comparación con las otras alternativas de rehabilitación?

⑥

Llevar a cabo diseños de mezcla en el laboratorio para determinar las propiedades del material reciclado

⑦

¿Se requieren agregados adicionales?

Si

Muestreo de fuentes de agregados

Finalizar el diseño del pavimento y concretar los costos de construcción para el reciclaje superficial.

5.3 INVESTIGACIÓN DEL PAVIMENTO²⁵

La investigación del pavimento comprende la recopilación de la información disponible, los análisis de tráfico y la implementación de métodos adecuados de investigación y es por ello que en el desarrollo de este capítulo se presentan algunos de los métodos más conocidos y la selección de alguno de ellos dependerá de las condiciones del pavimento y de la información que se requiera recavar, con el objeto de obtener suficientes datos para realizar el diseño del pavimento.

5.3.1 Estudio de la información disponible

Antes de tomar decisiones finales con respecto al tipo y frecuencia de los diferentes métodos de investigación que deberán usarse para un proyecto en particular, tiene que efectuarse un estudio de toda la información pertinente disponible. Vale la pena indagar si el proyecto cae dentro de un sistema de gerencia de pavimentos, y de ser así, éste podría suministrar información útil.

Los registros de construcción, de estar disponibles, deben estudiarse para determinar:

- El diseño del pavimento originalmente especificado.
- Los espesores de las capas construidas, junto con cualquier cambio en los diseños especificados del pavimento.
- Los resultados de los procesos y ensayos de control de calidad desarrollados durante la construcción.
- Las fuentes y la calidad de los materiales disponibles en las canteras y zonas de préstamo locales.

²⁵ Ibidem

Debe recopilarse la mayor información posible sobre el tráfico con el objeto de realizar indagaciones sobre:

- Conteos de tráficos históricos y actuales.
- Porcentaje de vehículos pesados;
- Cargas legales por eje; y
- Estadísticas de sobrecarga de los vehículos.

5.3.2 Análisis del tráfico de diseño

La información disponible debe usarse completamente, pero si ésta no es suficiente, sobre todo al realizar diseños de pavimentos para vías con tráfico pesado, han de llevarse a cabo conteos de tráfico por categorías. Es importante obtener un estimativo preciso del porcentaje de vehículos pesados que usarán la vía, así como del espectro de cargas transportadas por estos vehículos.

Los análisis detallados del tráfico son esenciales en los diseños de pavimentos en los que se consideran estrategias a mediano o largo plazo, es decir, cuando el período de diseño es de diez años o mayor. Rara vez se requieren análisis elaborados del tráfico para estrategias a muy corto plazo; en estos casos es necesaria la información sobre los volúmenes de tráfico con el objeto de planear los trabajos para reducir las alteraciones al mismo y las congestiones durante la construcción.

La información usada para calcular el número de E.E. acumulados (tráfico de diseño) no es exacta; por tanto, usualmente se requiere llevar a cabo un análisis de sensibilidad para investigar cómo los cambios en los datos influyen en el tráfico de diseño.

5.3.2.1 El tráfico

Los volúmenes proyectados del tráfico y su composición en términos del tamaño y masa de los vehículos, dictaminan, en gran medida, la geometría de la carretera (alineamiento, número de carriles, etc.) y los requerimientos de la estructura del pavimento. Es por lo tanto muy importante ser tan preciso como sea posible en la predicción del tráfico futuro cuando se realiza el diseño de un pavimento.

Los aspectos importantes del tráfico, desde la perspectiva del diseño de pavimentos, son aquellos que permiten la definición de la magnitud y de la frecuencia de las cargas aplicadas a la superficie, que la carretera podrá soportar durante su vida útil. La carga impartida por una rueda a la superficie de una carretera esta definida por tres factores:

- La carga (en kN) realmente soportada por la rueda, la cual.
- La presión de inflado (en kPa) determina la "huella" de la llanta sobre la carretera. Esta huella define el área sobre la superficie la superficie del pavimento que esta sujeta a la carga.
- La velocidad de viaje que define la frecuencia a la cual la superficie es cargada y descargada.

Los vehículos de pasajeros tienen presiones de inflado en el rango de 180 a 250 kPa y soportan menos de 250 kg por llanta, o de 5 kN sobre un eje. Estas cargas son insignificantes cuando se les compara con las impartidas por los grandes camiones usados para transportar cargas pesadas, las cuales son, generalmente, de 80 kN por eje, con presiones de inflado variando entre 500 a 900 kPa. Lógicamente las cargas de los

vehículos pesados tendrán la mayor influencia sobre los requerimientos de resistencia del pavimento.

5.3.2.1.1 Carga equivalente por eje estándar (E.E.)

Las cargas de los vehículos pesados se encuentran normalizadas, y los pavimentos para carreteras se diseñan de acuerdo con ellas. El término "carga legal por eje" es usado para definirla máxima carga permitida por eje simple. Esta carga varía de país a país, típicamente entre 80 kN y 130 kN. Para propósitos de diseño del pavimento, también debe contemplarse la configuración de los ejes del vehículo. Esto se logra considerando la carga de un vehículo pesado en términos de las "Cargas Equivalentes a un Eje Estándar" (E.E.)

Tabla 5.1 Cargas en Eje Estándar Equivalente por tipo de Vehículo	
<i>Tipo de vehículo pesado (cargado)</i>	<i>Número promedio de E.E. por vehículo</i>
Camión de 2 Ejes	0,70
Bus de 2 Ejes	0,75
Camión de 3 Ejes	1,70
Camión de 4 Ejes	1,80
Camión de 5 Ejes	2,20
Camión de 6 Ejes	3.50
Camión de 7 Ejes	4,40

La **Tabla 5.1** puede emplearse como una guía para determinar el Número de Ejes Equivalentes que serán aplicados sobre la superficie de una carretera por diferentes tipos de vehículos pesados. Se debe notar que a los vehículos livianos no se les ha asignado un factor y que por lo tanto no son significativos desde la perspectiva del diseño de pavimentos.

5.3.2.1.2 Clasificación del tráfico

Para propósitos del diseño del pavimento (contrario al diseño geométrico), normalmente el tráfico se clasifica de acuerdo con el número de E.E. que se espera solicitarán la carretera durante su vida de diseño. Este concepto introduce un marco de tiempo que requiere la definición del "período de diseño". Normalmente los propietarios de una carretera esperan un retorno de la inversión realizada en el pavimento, y para efectos de este cálculo emplean períodos que varían entre 5 y 20 años. Este período de retorno es entonces el usado para definir el período de diseño del pavimento. La predicción del tráfico de diseño (o del número de E.E. esperados durante este período) se trata en la siguiente sección.

En el diseño de pavimentos, los términos "liviano/medio/pesado" son demasiado subjetivos para utilizarlos por sí solos como un sistema de clasificación del tráfico. Por tal razón, éste se clasifica en términos de l número de E.E., como se muestra en la

Tabla 5.2

Tabla 5.2 Clasificación del tráfico		
<i>Clase de tráfico</i>	<i>Número de E.E.</i>	<i>Descripción</i>
0	Menor de 0.3×10^6	Muy liviano
1	$0,3$ a 1×10^6	Liviano
2	1 a 3×10^6	Liviano / medio
3	3 a 10×10^6	Medio
4	10 a 30×10^6	Pesado
5	30 a 100×10^6	Muy pesado

5.3.2.1.3 Predicción del tráfico de diseño

Para estimar la magnitud del tráfico y el número de E.E. que usarán la vía durante su período de diseño, se emplean datos históricos, cuando éstos se encuentran disponibles. La expresión para determinar el tráfico de diseño tiene en cuenta el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), el porcentaje de tráfico pesado (H), el número de E.E. promedio por vehículo pesado y el factor de crecimiento del tráfico (f_y).

Fórmula 5.1

$$\text{Tráfico de diseño} = \text{TPDA} \times H \times \text{E.E.} \times f_y$$

Tanto el TPDA como el H a menudo se determinan a partir de conteos previos. Cuando no se cuenta con tal información, deben realizarse conteos físicos o electrónicos durante un período de tiempo representativo.

Los conteos de tráfico deben incluir el número total de vehículos por día que viajan en cada carril (en cada dirección), discriminados de acuerdo con el tipo de vehículo. La clasificación de la carretera y la tecnología disponible, normalmente, dictaminarán si hay que realizar conteos electrónicos; hoy en día se dispone de métodos sofisticados para cuantificar el número de ejes y el peso de los vehículos en movimiento, pero debido a su alto costo sólo se usan en carreteras importantes. Los conteos físicos son los más populares, y dependiendo del nivel de competencia de las personas que los realicen, puede obtenerse información confiable, ordenando los vehículos pesados en diferentes clases (de acuerdo con su número de ejes) y anotando cuándo se encuentran cargados o descargados.

En razón de que la filosofía del diseño de pavimentos está basada en la carga legal por eje, el grado de sobrecarga de los vehículos es un dato muy importante. Las sobrecargas causan daños severos a los pavimentos y cualquier dato al respecto deberá obtenerse de las autoridades competentes. En ausencia de información confiable, es recomendable hacer una valoración mediante sondeos de carga. Debe pesarse físicamente una muestra representativa de los vehículos pesados para determinar el número (o porcentaje) de ellos que se encuentran sobrecargados y el grado de sobrecarga. Estos resultados pueden extrapolarse para toda la población de vehículos pesados.

La fórmula 5.2 para determinar el factor de crecimiento del tráfico (**f_y**) tiene como datos de entrada la tasa de crecimiento anual del tráfico (**i**), expresada en porcentaje, y el período de diseño (**y**), en años:

Fórmula 5.2

$$f_y = 365 * \frac{(1 + 0.01 * i) \{ (1 + 0.01 * i)^y - 1 \}}{0.01 * i}$$

De manera alterna, el factor de crecimiento del tráfico (**f_y**) puede leerse en tablas estándar, como la **Tabla 5.3**. No obstante, allí no se incluyen todos los valores de las variables **i** e **y**, debiéndose tener cuidado al hacer estimaciones entre valores, ya que una interpolación o extrapolación directa puede arrojar valores imprecisos.

Tabla 5.3 Factor de crecimiento del tráfico (fy)					
<i>Periodo de diseño y (años)</i>	<i>Tasa de crecimiento del tráfico</i>				
	<i>2%</i>	<i>4%</i>	<i>6%</i>	<i>8%</i>	<i>10%</i>
		1611	1692	1776	1863
6	2348	2517	2698	2891	3097
8	3195	3497	3829	4192	4591
10	4076	4557	5099	5710	6398
15	6438	7600	9005	10703	12756
20	9045	11303	14232	18039	22995

Cuando se está estimando la tasa de crecimiento anual del tráfico (i), deben identificarse otros factores diferentes de los económicos normalmente usados. El mejoramiento de una carretera en afirmado y la rehabilitación del pavimento a menudo atraen el tráfico que por lo general utilizaría rutas alternas.

5.3.3 Métodos de investigación

Existen diferentes métodos de investigación disponibles, los cuales deben seleccionarse apropiadamente teniendo en cuenta diferentes enfoques de diseño. En muchos casos los resultados de varios ensayos pueden compararse entre sí con el propósito de confirmar las razones del deterioro o de la falla del pavimento y, de esta manera, entender mejor el comportamiento del mismo.

En las siguientes secciones se tratan brevemente los métodos más usados.

5.3.3.1 Inspección visual

Esta es una de las herramientas más poderosas para la rehabilitación de pavimentos y forma parte esencial de toda la investigación. La inspección visual se efectúa generalmente en dos fases:

Inspección visual inicial.

Con este tipo de inspección se pretende obtener una impresión general del proyecto y definir los límites de secciones homogéneas, en las que se tengan tipos y niveles similares de deterioro. La inspección visual inicial generalmente se lleva a cabo conduciendo a baja velocidad por la longitud total de la vía.

Inspección visual detallada.

La longitud total de la vía se inspecciona, donde sea práctico, caminando por ella. Se toman notas detalladas de las fallas que ocurren a través de toda la sección transversal del pavimento, y se anotan otras observaciones, tales como el drenaje, cambios geológicos y aspectos geométricos (por ejemplo: pendientes, curvaturas, terraplenes). En caso de que lo anterior no resulte práctico debido a la longitud del proyecto, la inspección visual debe realizarse sobre muestras tomadas de cada sección uniforme que se haya identificado.

Se reconocen cuatro modos diferentes de deterioro y éstos a su vez se clasifican en tipos, como se muestra en la **Tabla 5.4**.

Durante la inspección visual los diferentes modos y tipos de falla del pavimento se describen en función de su severidad, frecuencia y localización. La inspección

suministra indicios importantes sobre las causas de la falla del pavimento, en especial si sus resultados se combinan con los obtenidos con otros métodos de investigación.

Tabla 5.4 Modos y tipos de deterioro	
<i>Modo de deterioro</i>	<i>Tipo de deterioro</i>
Deformación	Ahuellamiento, depresiones, abultamientos
Agrietamiento	Piel de cocodrilo, en mapa, en bloque, longitudinales, transversales
Desintegración de la superficie	Baches, desmoronamiento, parches, rotura de
Lisura de la textura superficial	Exudación, pulimento.

5.3.3.2 Penetrómetro dinámico de cono

El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) (**Figura 5.4**) es una herramienta bastante simple que consiste en una varilla de acero con una punta cónica hecha de acero endurecido, la cual se introduce en el pavimento mediante golpes de un martillo que se deja caer desde una altura estándar. Las medidas que se toman corresponden a la tasa de penetración por golpe a través de las capas del pavimento, tasa que es función de la resistencia in situ del pavimento.

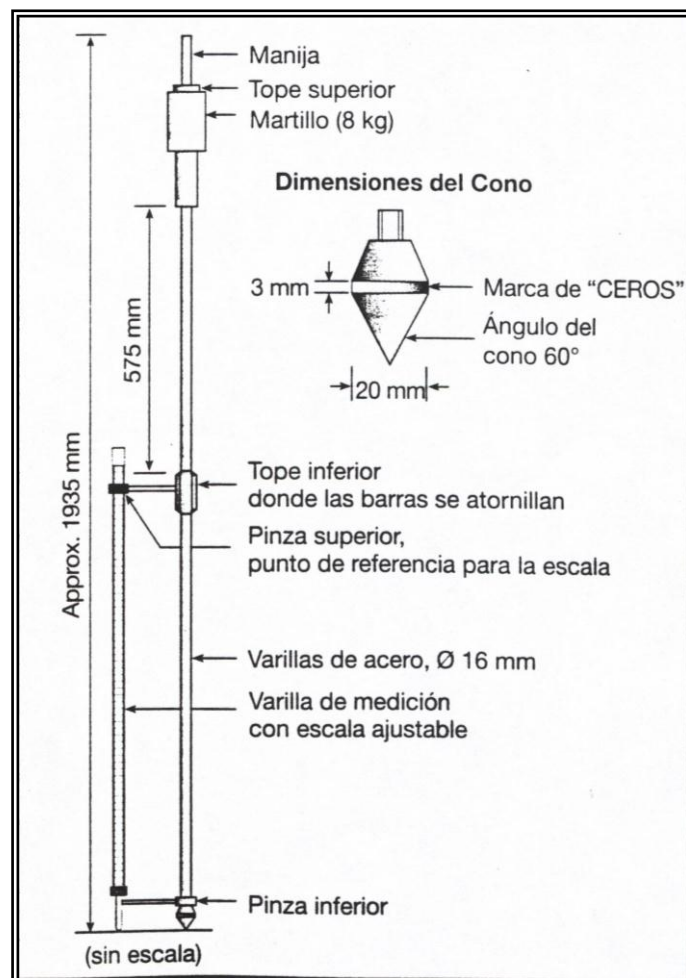
Normalmente, el ensayo se lleva a cabo hasta una profundidad de 800 mm, lo que permite dibujar un perfil que indica las propiedades reales de los materiales que constituyen las capas del pavimento.

En materiales granulares, las medidas del DCP correlacionan bien con el valor ampliamente conocido de la Capacidad Portante de California (CBR) y en materiales li-

geramente cementados se correlacionan bien con la resistencia a la compresión inconfiada (UCS). Los resultados del DCP se pueden usar también para estimar el módulo de elasticidad de los materiales del pavimento.

En la actualidad se dispone de sofisticados programas de computador que facilitan los análisis de los ensayos con el DCP y permiten estimar los valores del CBR in situ, de la UCS y de los módulos elásticos, así como tener un indicativo del balance del pavimento y de su capacidad estructural.

Fig. 5.4 Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP).



5.3.3.3 Apiques

Los Apiques representan una parte importante de la investigación del pavimento. Además de ganar una apreciación visual útil del material de las capas del pavimento expuesto en las paredes del apique, facilitan la toma de muestras para ensayos de laboratorio en los que se determine la calidad del material existente en las capas del pavimento, de cuyos resultados se puede establecer el tratamiento más efectivo para los materiales que van a reciclarse.

Los apiques también permiten determinar:

- Los espesores de las capas del pavimento.
- Los contenidos de humedad in situ.
- Medidas precisas de la compactación in situ de cada capa.
- El estado de las diferentes capas (por ejemplo: su grado de agrietamiento y de cementación).

Los apiques se excavan por lo general en la trayectoria externa de las ruedas en un carril de tráfico, pero en algunos casos pueden realizarse en otros sitios, como por ejemplo a lo largo de una berma fallada de la carretera. Igualmente pueden excavarse en forma de trinchera, a lo ancho de un carril de tráfico con el objeto de investigar la profundidad a la cual se extiende la deformación bajo la capa de rodadura. La profundidad típica de los apiques es de 1 m. El material excavado de cada capa se amontona por separado en la vecindad del apique. A medida que se progresa en la excavación, se realizan ensayos de densidad sobre cada capa sucesiva.

Una vez que se ha excavado totalmente el apique, se registra de manera detallada el perfil y se toman muestras representativas de cada capa para los ensayos de laboratorio.

5.3.3.4 Toma de núcleos.

Las ventajas de las tomas de núcleos en comparación con los apiques radican en que son relativamente más rápidas, causan una menor alteración del tráfico y son mucho más económicas. Los núcleos de muestras permiten realizar una verificación precisa de los espesores de los materiales ligados, tales como mezclas asfálticas o agregados cementados y pueden ensayarse rápidamente para determinar sus propiedades.

La desventaja de las perforaciones normalmente radica en que la profundidad de muestreo está limitada a los 200 o 300 mm superiores del pavimento y tanto los agregados no ligados como los suelos no pueden muestrearse en forma apropiada, debido a la pérdida usual de material durante este proceso. En muchos casos es imposible determinar de manera precisa el espesor de las capas no ligadas usando este método.

5.3.3.5 Medidas de la profundidad de ahuellamiento

Las medidas de la profundidad de ahuellamiento pueden realizarse manualmente, con el uso de una regla (por lo general de dos metros de longitud) que se coloca en forma transversal a la trayectoria de las ruedas, en cada carril de tráfico. Se registra la máxima profundidad de ahuellamiento, así como el ancho de éste.

La profundidad del ahuellamiento también puede medirse con equipos móviles sofisticados que emplean técnicas con láser.

5.3.3.6 Medidas de deflexiones.

Las medidas de las deflexiones son una herramienta importante en la investigación no destructiva del pavimento. Cuando la carga de la rueda de un vehículo en movimiento se aplica sobre la superficie del pavimento se presenta una deflexión. La magnitud de la deflexión y la forma de la cuenca de deformación producida por la carga son útiles para investigar las propiedades in situ del pavimento.

Se han desarrollado varios métodos para medir la respuesta de un pavimento bajo carga y se usan como medios para obtener la condición estructural y la capacidad de soporte de carga. Entre los sistemas de medida de deflexiones ampliamente usados se incluyen la Viga Benkelman y aquellos basados en el principio de caída libre de una masa.

En este último método se requiere un impulso dinámico para simular el efecto de una rueda en movimiento usando un equipo como el deflectómetro de impacto. A distancias fijas, desde un punto sobre el cual se aplica la carga, se miden de manera simultánea las deflexiones, lo cual permite establecer la superficie de la deformación y la cuenca de deflexiones. Las medidas de deflexiones pueden emplearse en diferentes métodos de diseño, como se trata en la sección "Métodos basados en las deflexiones".

5.3.3.7 Ensayos de laboratorio.

Las muestras tomadas de los apiques, así como los núcleos, se someten a ensayos de laboratorio para determinar la calidad de los materiales existentes en las capas del pavimento y de los materiales de la subrasante. También deben someterse a los mismos ensayos las muestras de los agregados tomadas de las zonas de préstamo y de las

canteras que se usarán en las mezclas con el material reciclado.

Los ensayos típicos incluyen análisis por **tamizado, plasticidad y Capacidad de Soporte de California (CBR.)**

Los resultados de estos ensayos se usan tanto para la selección de los agentes estabilizadores más apropiados (como se discute en el capítulo 4 sobre Diseño de mezclas), como para la evaluación de la capacidad estructural del pavimento existente.

5.4 ENFOQUES PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Se presentan dos enfoques de diseño: 1-Wirtgen.

2-Instituto del Asfalto

5.4.1 Enfoques para diseño según Wirtgen²⁶

Las fases de investigación y diseño tienden a traslaparse, siendo el primer objetivo entender el comportamiento del pavimento y, el segundo, diseñar la rehabilitación más económica, teniendo en cuenta las expectativas del propietario de la carretera referentes al período de diseño, las propiedades de funcionalidad y los costos de mantenimiento.

El diseño por métodos racionales se prefiere como un medio para verificar la capacidad del pavimento existente e identificar zonas de debilidad, al igual que para efectuar el diseño de la rehabilitación. Se pueden usar otros métodos para verificarse el diseño así obtenido.

²⁶ Ibidem.

En la sección 5.3.3 se trataron todos los métodos usados normalmente para la investigación de pavimentos deteriorados. Sin embargo, rara vez se utilizan todos estos métodos en un proyecto específico, pues la categoría de reciclaje es la que dictamina el nivel de investigación requerido. Lo siguiente se incluye como una referencia rápida de los métodos de investigación más aplicables para cada categoría de reciclaje.

Reciclaje profundo

- Inspección visual
- Apiques y toma de muestras para ensayos de laboratorio
- Toma de núcleos
- Pruebas con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Medidas de deflexiones

Reciclaje superficial

- Inspección visual
- Verificación del espesor de las capas asfálticas, normalmente por medio de la toma de núcleos
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Ejecución de apiques hasta la profundidad de reciclaje propuesta con el objeto de tomar muestras para los diseños de las mezclas.

5.4.1.1 Generalidades

Al decidir el método que hay que utilizar, debe tenerse presente que cada proyecto es único y que el objetivo de los trabajos de investigación es obtener información suficiente que permita formular un diseño apropiado del pavimento. Adicionalmente a la investigación del pavimento, deben evaluarse las fuentes de materiales y los productos requeridos en el proceso de rehabilitación, tales como gravas, piedras trituradas, agua, cemento y ligantes asfálticos. (Lo anterior normalmente implicará visitas a las fuentes locales y a las zonas de explotación de gravas y toma de muestras para ensayarlas en el laboratorio. También deben tomarse muestras de cemento y de ligantes asfálticos, para su ensayo.)

5.4.1.1.1 Diseño de mezclas

El diseño de mezclas es una parte esencial de la investigación del pavimento, cuyo propósito es establecer el método más efectivo para tratar los materiales de la capa por reciclar (en el capítulo 4 se incluyen los procedimientos para el diseño.)


Las muestras representativas tomadas de la capa por reciclar se someten a ensayos para determinar sus propiedades actuales en virtud de lo cual se realiza el diseño de la mezcla. Las muestras deben prepararse para simular, lo más cercanamente posible, la gradación alcanzada en el material durante el proceso real de reciclaje; si es posible, debe emplearse una máquina fresadora pequeña para triturar el material del pavimento. En algunas circunstancias, dependiendo de la calidad del material por reciclar, así como

de las propiedades requeridas del producto final, resulta necesario que este material se mezcle con agregados importados.

5.4.1.1.2 Confiabilidad de los métodos de diseño

A través de los años los métodos de diseño de pavimentos han evolucionado desde los empíricos relativamente simples hasta los de modelación más complejos que requieren programas sofisticados de computador. En las siguientes secciones se revisan brevemente los métodos que pueden aplicarse para el diseño de pavimentos cuando se contempla el reciclaje en frío.

En la **Tabla 5.5** se resumen diferentes métodos de diseño de pavimentos, organizados de menor a mayor complejidad y nivel de confianza con que se pueden utilizar los resultados.

Tabla 5.5 Aplicación de diferentes métodos de diseño			
	<i>Métodos de diseño</i>	<i>Ensayos /Análisis</i>	<i>Investigaciones requeridas</i>
	Basados en el CBR	Ensayo de CBR	Ensayos de laboratorio
	Basados en el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)	CBR / Resistencia a la compresión inconfiada / Módulo E	Pruebas con el DCP
	Basados en las medidas de deflexión: • Deflexión de la superficie • Cuenca de deflexiones	Deflexión	Medidas de deflexiones de la superficie y de la cuenca de deflexiones
	Métodos de diseño racionales o mecanísticos	Módulo E / Relación de Poisson / Espesor de las capas	DCP Cuenca de deflexiones Ensayos de laboratorio

5.4.1.1.2.1 Métodos de diseño basados en el CBR

Los métodos de diseño basados en el CBR son empíricos y se fundamentan en los valores del CBR saturado de los materiales del pavimento. En el método se asume que cada capa actúa de manera independiente en la estructura del pavimento. Los métodos típicos los han desarrollado el Instituto del Asfalto y el Transportation Road Research Laboratory (TRRL.)

En razón de que el método tiene un fundamento empírico, debe usarse solamente como una guía y verificar el diseño con otros métodos.

5.4.1.1.2.2 Método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono

El método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) se desarrolló con el objeto de permitir una evaluación detallada de la estructura del pavimento. Debido a que es un método con base empírica, se recomienda usarlo junto con otros métodos de diseño.

El DCP puede emplearse para:

- Estimar el CBR in situ de materiales granulares y de suelos, así como la resistencia a la compresión inconfiada de capas ligeramente cementadas.
- Determinar el perfil de resistencia del pavimento existente.
- Establecer el balance de resistencia entre las capas del pavimento.
- Valorar la capacidad estructural del pavimento existente.
- Diseñar el refuerzo del pavimento.

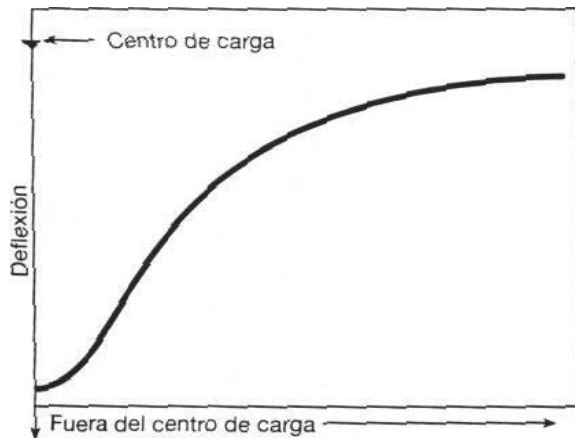
- Estimar el módulo elástico de los materiales in situ. Este módulo puede emplearse para los análisis por métodos racionales de la estructura del pavimento.

5.4.1.1.2.3 Métodos basados en las deflexiones

Los métodos de diseño de la rehabilitación basados en las deflexiones se enfocan en el análisis de la respuesta a la carga en donde se mide la máxima deflexión de la superficie bajo una carga aplicada y luego ésta se correlaciona con los parámetros de comportamiento del pavimento. Se emplean dos métodos fundamentados en la deflexión: los que tienen en cuenta las medidas de la deflexión de la superficie y los que utilizan las medidas de la cuenca de deflexiones.

Cuando un pavimento se somete a la carga de una rueda, éste sufre una deformación conocida como la cuenca de deflexiones, la cual puede usarse en un procedimiento conocido como retroanálisis para estimar el módulo elástico de cada capa del pavimento. En este procedimiento, en el que normalmente se emplean programas de computador tales como MODULUS, ELOMOD, o BOWLER, se calculan deflexiones teóricas bajo la carga aplicada usando un valor asumido del módulo para cada capa. Las deflexiones teóricas se comparan con las deflexiones medidas en la cuenca, y luego el módulo asumido se ajusta en un proceso iterativo hasta que las deflexiones teóricas y las medidas sean iguales. Puede aceptarse que los módulos así derivados son similares a los de las capas del pavimento y estos valores pueden utilizarse, junto con los espesores de las capas del pavimento, en los análisis por métodos racionales. En la **Figura 5.5** se muestra una cuenca de deflexiones típica.

Fig. 5.5 Cuenca de deflexiones típica



Entre los métodos que se basan en las medidas de la deflexión de la superficie se encuentran los del Asphalt Institute y los del TRRL. El método desarrollado por el Instituto del Asfalto se fundamenta en la relación existente entre la Deflexión

Elástica Representativa (RRD) y las repeticiones de las cargas de tráfico, mientras que el método del TRRL se basa en la relación entre la deflexión estándar y el tráfico acumulado. En ambos se toma el ahuellamiento de 10 mm como la condición crítica del pavimento.

Estos métodos de diseño se fundan en las medidas realizadas sobre pavimentos, en los cuales la principal causa del deterioro es la mala calidad de la subrasante; por tanto, solamente pueden usarse con confianza en aquellos pavimentos en los cuales su falla se atribuye a una subrasante débil, más que a la debilidad de las capas del pavimento

5.4.1.1.2.4 Métodos racionales de diseño

Existe una clara tendencia a emplear los métodos racionales de diseño de pavimentos, los cuales se basan en los principios fundamentales de la ingeniería; por lo general arrojan un mayor nivel de confianza, comparados con los métodos derivados empíricamente.

El método de diseño más usado es el elástico-lineal para capas múltiples, aunque también se encuentran disponibles otros enfoques de diseño como los análisis elásticos-no lineales y los análisis elasto-plásticos.

En los métodos racionales de diseño se emplean programas de computador como el ELSYM5, CHEV, WELSEA, CIRCLY y el NSTRESS para determinar la respuesta del pavimento, en términos de las deflexiones, esfuerzos y deformaciones en cada capa del pavimento. Como datos de entrada, el método requiere los espesores y las propiedades de los materiales (módulo elástico y relación de Poisson) de las diferentes capas del pavimento. Los programas calculan la respuesta a la carga de diseño de cada capa en términos de la deflexión, esfuerzo y deformación. Estos valores se usan junto con las funciones de transferencia para calcular la capacidad estructural del pavimento.

Los métodos racionales tienen claras ventajas para el diseño de una rehabilitación, ya que permiten modelar el pavimento fallado e identificar zonas de debilidad. Con el uso de estos métodos pueden modelarse diferentes opciones de rehabilitación para reforzar el pavimento.

5.4.1.2 Procedimientos para el diseño de pavimentos.

En la **Figura 5.12** se muestran diseños de estructuras típicas de pavimentos, que incluyen capas recicladas tratadas con cemento y ligantes asfálticos.

Se hace énfasis en que las estructuras mostradas en este documento deben tomarse solamente como indicativas de los diseños que resultan adecuados para las diferentes

clases de tráfico. En estos ejemplos se han asumido las propiedades típicas de los materiales de las capas recicladas y se ha tomado una subrasante uniforme con rigidez superior a 100 MPa (aproximadamente un CBR de 10.) Se ha empleado una carga por eje de 80 KN.

Debe entenderse que cada proyecto de rehabilitación es único en términos de tipo, espesores y calidad de los materiales en las capas del pavimento existente y en la subrasante. Por tanto, es necesario llevar a cabo los trabajos de investigación y diseño recomendados en este capítulo para evaluar apropiadamente el pavimento y lograr el diseño más adecuado del mismo.

5.4.1.2.1 Pasos para el diseño en el reciclaje profundo

PASO 1 Determinación de los requerimientos del propietario de la vía

El primer paso en el proceso del diseño de una rehabilitación es determinar, junto con el propietario de la vía, los siguientes aspectos:

- El período de diseño que requiere el pavimento rehabilitado antes de necesitarse cualquier refuerzo.
- El nivel de mantenimiento que necesariamente considera que debe llevarse a cabo durante el período de diseño de la vía.
- Los estándares de funcionamiento requeridos del pavimento reciclado, tales como el índice de servicio.
- La información sobre el tráfico.
- La información disponible del pavimento.

- El tipo y posición de los servicios que pueden afectarse por la construcción.
- Los problemas prácticos en la construcción, por ejemplo la acomodación del tráfico y el control del mismo, durante el período de investigación.

PASO 2 Recolección de la información disponible

La información debe tomarse del sistema de administración del pavimento que posea el propietario de la vía, así como de otros registros. Un ejemplo típico de la construcción original de un pavimento sería el siguiente:

40 mm de rodadura en concreto asfáltico

120 mm de base asfáltica

300 mm de piedra caliza triturada



PASO 3 Información del tráfico

Para calcular el tráfico de diseño, debe recolectarse toda la información posible.

En el siguiente ejemplo se muestra cómo puede usarse la fórmulas 1 y 2, con el fin de determinar el tráfico de diseño para un proyecto.

Tabla 5.6 Cálculo del tráfico de diseño		
ÍTEM	Descripción	Valor
1	Tráfico promedio diario anual (AADT)	5000
2	Porcentaje de vehículos pesados (H)	20
3	Cargas promedio por eje equivalente / vehículo pesado (E.E.)	1,8
4	Tasa esperada de crecimiento del tráfico (i, porcentaje)	4
5	Período de diseño (y, en años)	10
6	Factor de crecimiento de tráfico (fy), calculado usando la Fórmula 5.2, o tomado de la Tabla 5.3	4557
7	Tráfico de diseño en E.E. Calculado usando la Fórmula 1.1 (Ítem 1 x $\frac{\text{ítem 2}}{100}$ x Ítem 3 x Ítem 6)	$8,2 \times 10^6$ (Tráfico Clase T3)*

* Ref. Tabla 5.21

PASO 4 Investigación del pavimento

La investigación del pavimento es una actividad muy general que implica actividades de campo las cuales están encaminadas a establecer un diagnóstico realístico del estado actual del pavimento. Sin duda algunas de estas actividades deben enmarcarse dentro del método científico de investigación. A continuación se describen algunos ejemplos de actividades de investigación involucradas en la evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método del reciclaje.

- **Investigación visual**

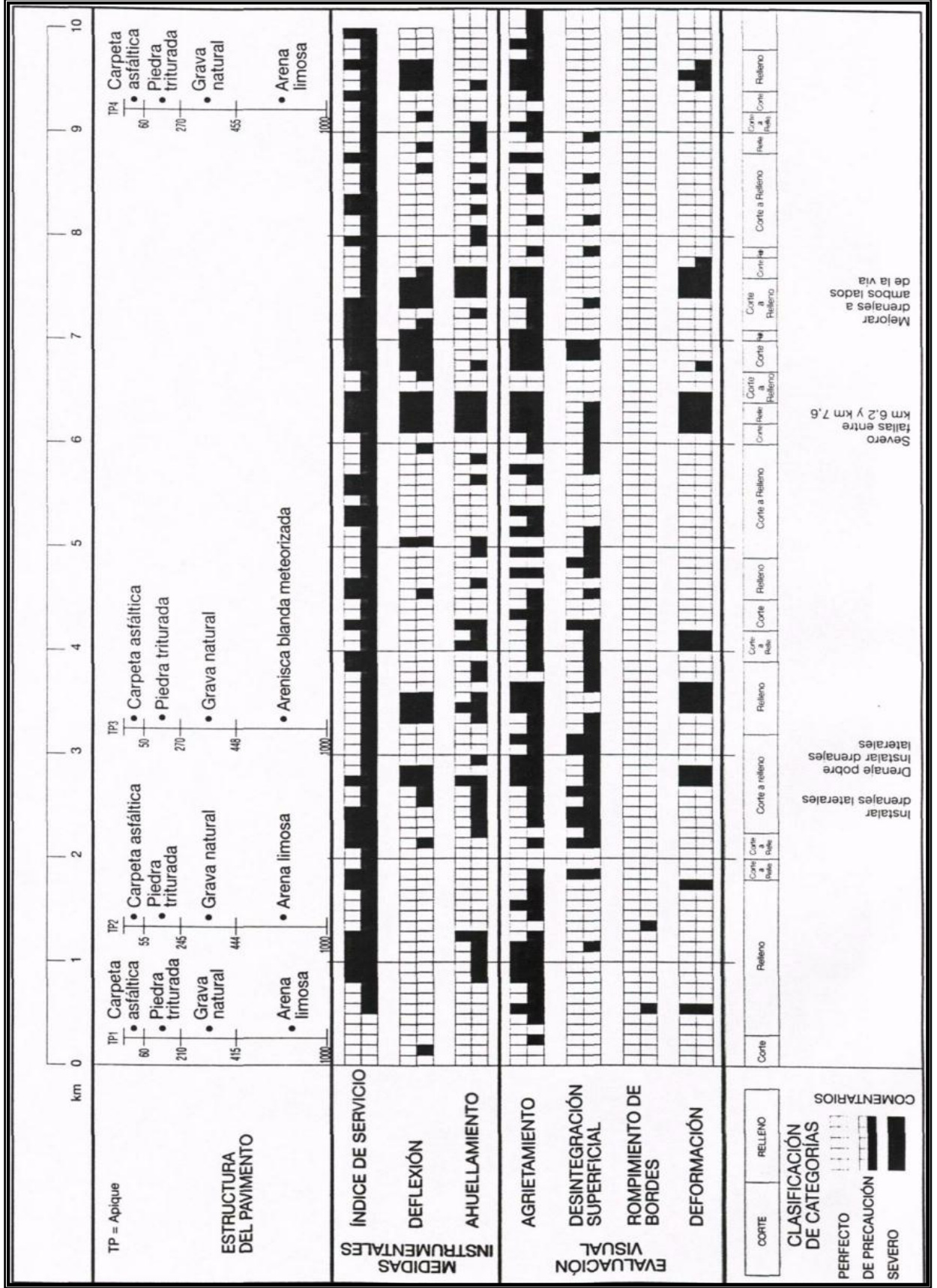
Las fallas identificadas visualmente deben registrarse en detalle para analizarse posteriormente, para este propósito existen varias metodologías las cuales cuantifican

longitudes y magnitud de severidad para llegar a establecer una condición actual de daño del pavimento a investigar desde el punto de vista de los porcentajes de la longitud de vía afectada por los diferentes tipos de falla, tal como se ilustra en el ejemplo de la **Tabla 5.7**. En este ejemplo puede observarse que la vía clasifica en la categoría de falla "severa" si hay fisuras y en la zona de "precaución" cuando existen deformación y desgaste de la superficie.

La inspección visual ofrece también la oportunidad de observar problemas relacionados con el drenaje, restricciones de altura bajo estructuras, e inestabilidad causada por rellenos con mucha pendiente. Los resultados de una inspección visual detallada pueden combinarse con otros parámetros en un diagrama compuesto, tal como se muestra en la **Figura 5.7**. Este tipo de presentación permite obtener una impresión general de la condición del pavimento que va a mejorarse.

Tabla 5.7 Análisis visual de fallas				
Modo de falla	% de longitud de vía sobre ancho total de vía que exhibe fallas severas	Criterio de comportamiento para cada modo de falla (% de la longitud de vía)		
		Intacto	Precaución	Severo
Agrietamiento	18	<5	5a15	>15
Deformación	14	<5	5a15	>15
Desintegración	3	<10	10a15	>15
Desgaste de la superficie	35	<20	20 a 40	>40


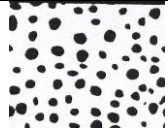

Fig. 5.6 Evaluación del pavimento



• **Muestras de apiques y núcleos**

El número de apiques que debe excavarse para obtener la información de la estructura del pavimento existente depende, en gran parte, de la cantidad de información disponible en los registros existentes de construcción, así como de la variabilidad de los materiales encontrados en el pavimento. Los apiques son esenciales para la investigación in situ de la estructura del pavimento y para obtener muestras de gran tamaño que se utilizarán en ensayos de laboratorio. Al examinar cuidadosamente el perfil del apique, puede obtenerse información valiosa acerca de las características in situ de los materiales encontrados en cada capa del pavimento y determinarse los espesores exactos de cada capa. En la **figura 5.7** se muestra un ejemplo del perfil de un apique.

Fig. 5.7 Perfil de apiques

Leyenda suelo	Prof. (mm)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO						Muestras
		Color	Consistencia	Condición de humedad	Estructura	Tipo de suelo	Origen	
	50	Rodadura asfáltica						2 bolsas
	140	Base asfáltica						4 bolsas gds. (~80 kg)
	310	Gris claro café	Suelta	Ligeramente húmeda	fragmentada	Triturado arenisca cuarcítica	Importado	3 bolsas gds. (~ 70 kg)
	550	Café oscuro	Medianamente densa	Ligeramente húmeda	Intacta	Grava natural, arenisca meteorizada	Importado	3 bolsas gds. (~ 70 kg)
	1000	Gris café Oscuro	Densa	Húmedo	Fisurada	Arena arcillosa, arenisca altamente meteorizada	Residual	3 bolsas gds. (~ 70 kg)

De cada apique debe tomarse suficiente material para realizar ensayos de laboratorio, con los que pueda determinarse la calidad de los materiales en cada capa y en la subrasante, y llevar a cabo diseños de mezcla con agentes estabilizadores.

En situaciones de tráfico muy pesado, el número de apiques debe reducirse al mínimo requerido para obtener información suficiente de la estructura del pavimento y para que el diseño de la rehabilitación sea confiable. En este caso deben analizarse cuidadosamente los núcleos, los cuales pueden tomarse rápidamente con una menor interrupción del tráfico.

Los resultados de los ensayos hechos sobre muestras tomadas de los apiques tienen que consignarse como se muestra en la **Tabla 5.8**. Los núcleos deben tomarse para complementar los resultados de los apiques (en este ejemplo, los núcleos se usan para verificar el espesor de las capas asfálticas

Tabla 5.8 Resumen de resultados de un apique

<i>Apique N°</i>	<i>Descripción</i>	<i>Profundidad (mm)</i>	<i>Contenido de humedad natural (%)</i>	<i>Contenido de humedad óptimo (%)</i>	<i>CBR</i>	<i>Plasticidad</i>
1	Carpeta asfáltica	150	--	--	--	--
	Piedra caliza triturada	300	4,5	6,0	85	6
	Arcilla arenosa	>540	13,8	14,2	9	12
2	Carpeta asfáltica	160	--	--	--	--
	Piedra caliza triturada	290	5,2	6,3	95	7
	Arcilla arenosa	>540	15,3	14,5	7	16

Los espesores de las capas, junto con los módulos elásticos derivados de los valores de CBR, la gradación y el índice de plasticidad, pueden emplearse en el diseño racional, mientras que los resultados de los contenidos de humedad son susceptibles de utilizarse para determinar si el pavimento sufre problemas relacionados con la humedad. En el

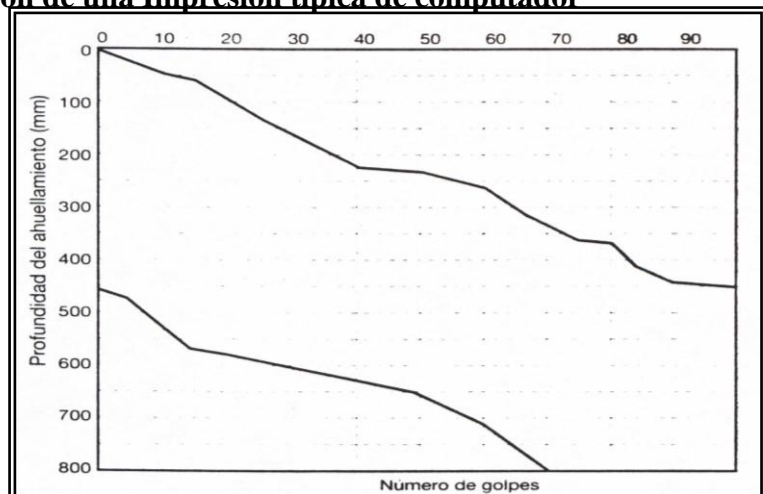
ejemplo anterior, el contenido de humedad ligeramente alto en la subrasante del apique N° 2 contrasta con los de las otras capas, los cuales son menores que sus respectivos contenidos de humedad óptimos, lo que indica que las fallas no pueden atribuirse a altos contenidos de humedad.

- **Ensayos con el Penetrómetro Dinámico de Cono**

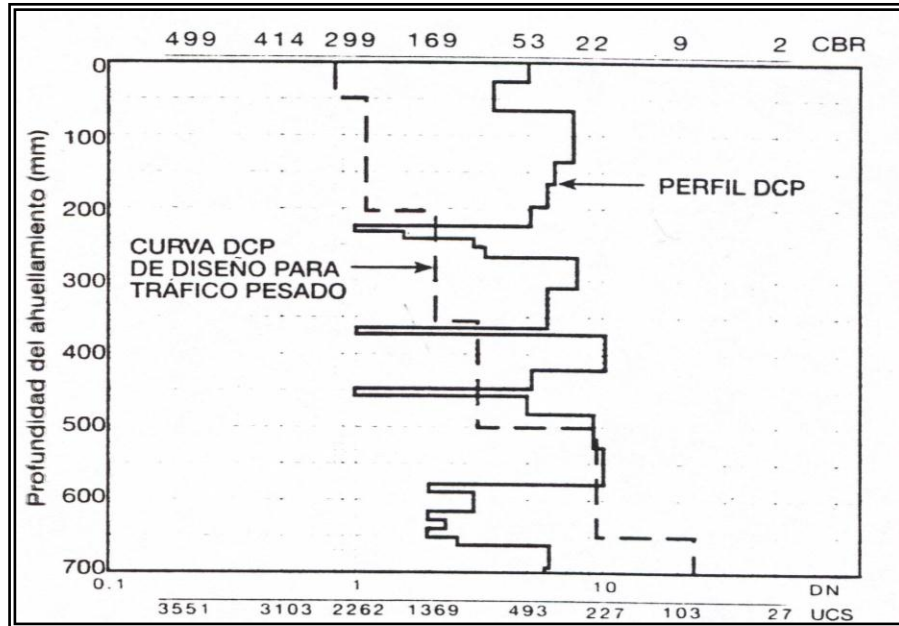
El DCP es una herramienta útil y relativamente barata para analizar estructuras de pavimento. Un aspecto que debe tenerse en cuenta es que no resulta práctico trabajar con el DCP en estructuras con capas asfálticas gruesas o en materiales fuertemente cementados ya que es aplicable únicamente a materiales de Sub-rasante compuestas de material fino con menos del 20% de gruesos. Si el espesor de las capas asfálticas de una estructura de pavimento es superior a 30 mm, se recomienda realizar el ensayo DCP en el apique, una vez que se hayan removido las capas asfálticas, o perforar a través de dichas capas antes de hacer la penetración. Obviamente, es poco aconsejable efectuar penetraciones si se ha usado agua como un refrigerante durante la operación de perforación, ya que la humedad afecta los resultados.

Fig. 5.8 Sección de una Impresión típica de computador

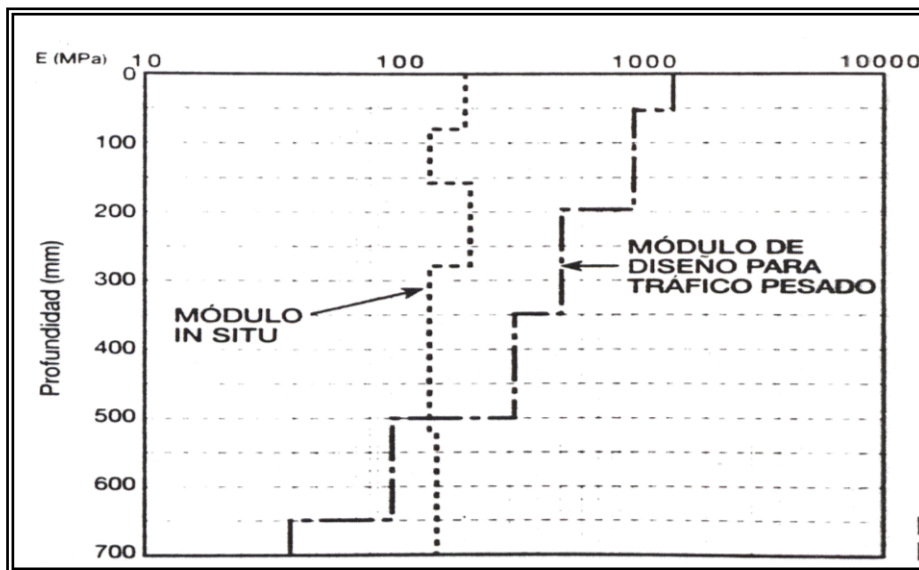
5.8a) Ejemplo de una curva DCP típica



5.8b) -Diagrama de Resistencia de la Capa
-Resistencia In Situ Dibujadas junto a la Curva DCP de Diseño para Tráfico pesado



5.8c) Diagrama de Resistencia de Capa en Función del Modulo-E (MPa)

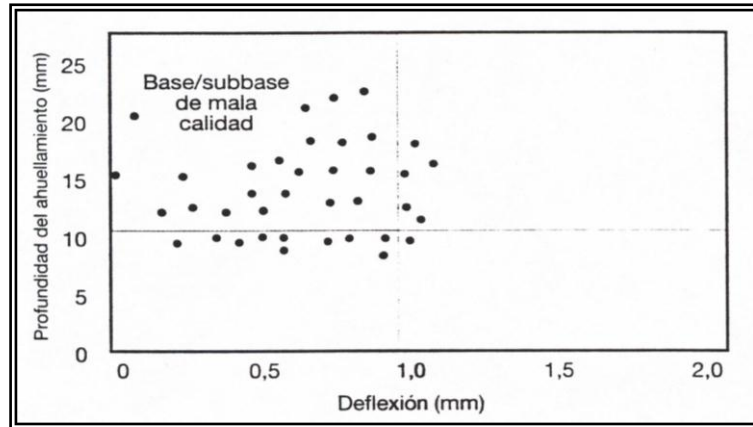


Es conveniente realizar el análisis de los resultados del ensayo DCP con programas de computador apropiados. Un ejemplo de la impresión de resultados es la **Figura 5.8**, en la que se muestra una curva típica del DCP en que la tasa de penetración se representa en un gráfico de golpes contra profundidad (**Fig. 5.8a**). También se muestra el diagrama de resistencia de las capas, que permite estimar los valores del CBR in situ (**Fig. 5.8b**) y la resistencia a la compresión inconfiada de varias capas del pavimento y de su subrasante (**Fig. 5.8c**). El perfil DCP se dibuja junto con la curva de diseño DCP para varios niveles de carga de tráfico, en este ejemplo, para tráfico pesado. Si el perfil DCP queda a la derecha de la curva de diseño, la resistencia, de esta porción del pavimento es inadecuada. En este ejemplo, los 200 mm superiores del pavimento presentan una resistencia inadecuada. El programa también estima el módulo elástico de los materiales in situ y hace un gráfico de módulo contra la profundidad del pavimento

- **Medida de la profundidad del ahuellamiento**

Con el propósito de identificar la posición de las debilidades dentro de una estructura del pavimento, deben graficarse las medidas de las profundidades de ahuellamiento contra las medidas de deflexión de la superficie, tal como se muestra en la **Figura 5.9**. En este ejemplo, la correlación indica que hay debilidades en las capas superiores del pavimento. El ancho del ahuellamiento es un indicador útil: anchos importantes indican fallas profundas en el pavimento, mientras que si son relativamente angostos las fallas se localizan en las capas superiores.

Fig. 5.9 Ejemplo de un Grafico de Datos de Deflexión – Profundidad de Ahuellamiento



- **Medidas de deflexiones**

Las medidas de las deflexiones de la superficie pueden compararse con el criterio de comportamiento. Un análisis de la deflexión al percentil 95, en el ejemplo simplificado de la **Tabla 5.9**, muestra que la vía se encuentra dentro de la categoría de falla "severa", lo que indica que el pavimento existente es inadecuado para soportar tráfico pesado y, por tanto, requiere un refuerzo.

Hay que anotar que este criterio de comportamiento varía significativamente, dependiendo del tipo de pavimento, y debe tomarse únicamente como ejemplo de cómo pueden utilizarse los resultados de la deflexión.

Tabla 5.9 Análisis de la deflexión de la superficie			
<i>Deflexión de la superficie, al percentil 95 (micras)</i>	<i>Criterio de deflexión de la superficie</i>		
	<i>Intacto</i>	<i>Precaución</i>	<i>Severo</i>
<i>700</i>	<i><200</i>	<i>200 - 600</i>	<i>>600</i>

Las deflexiones de la superficie se usan en conjunto con métodos de diseño de pavimentos como los desarrollados por el Instituto del Asfalto y el TRRL, los cuales resultan útiles en la determinación de la vida residual del pavimento. También se aplican para estimar los espesores de las capas asfálticas para el tráfico de diseño, pero no son fácilmente adaptables al diseño de pavimentos para procesos de reciclaje profundo.

Las medidas de la cuenca de deflexiones pueden usarse para calcular varios parámetros y compararlos con el criterio de comportamiento, como el mostrado en la **Tabla 5.10**, para pavimentos asfálticos que soportan tráfico pesado.

Tabla 5.10: Análisis de la cuenca de deflexiones

<i>Parámetros de la cuenca de deflexión</i>	<i>Límites típicos (micras)</i>	<i>Resultados típicos</i>
Índice de curvatura de la superficie	50 a 70	75
Índice de daño en la base	25 a 40	35
Índice de curvatura en la base	10 a 15	13

El índice de curvatura de la superficie refleja la rigidez relativa de la porción superior del pavimento (generalmente de las capas asfálticas), mientras que el índice de daño en la base y el índice de curvatura en la base muestran una rigidez relativa de los materiales de las capas inferiores del pavimento. En este ejemplo, el alto índice de curvatura de la superficie señala una debilidad en las capas superiores.

Cuando se analizan pavimentos en los que se considera el reciclaje, otra aplicación de las medidas de las cuencas de deflexión es la determinación, por retrocálculo, del módulo elástico. El valor del módulo puede utilizarse para el diseño racional en la modelación del pavimento existente, así como para analizar el efecto del reciclaje de la porción superior del pavimento.

Para localizar las debilidades en un pavimento, un método que puede utilizarse es la correlación de las deflexiones de la superficie con las profundidades de ahuellamiento.

En la **Figura 5.10a** se muestra que existe alguna correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento, pues se presenta un incremento general de esta última con un aumento de la deflexión, lo que es un indicio de la debilidad de la subrasante. Sin embargo, en la **Figura 5.10b** no es evidente la correlación entre profundidad del ahuellamiento y la deflexión, lo que señala una debilidad en las capas superiores del pavimento.

Fig. 5.10 a) Buena correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento.

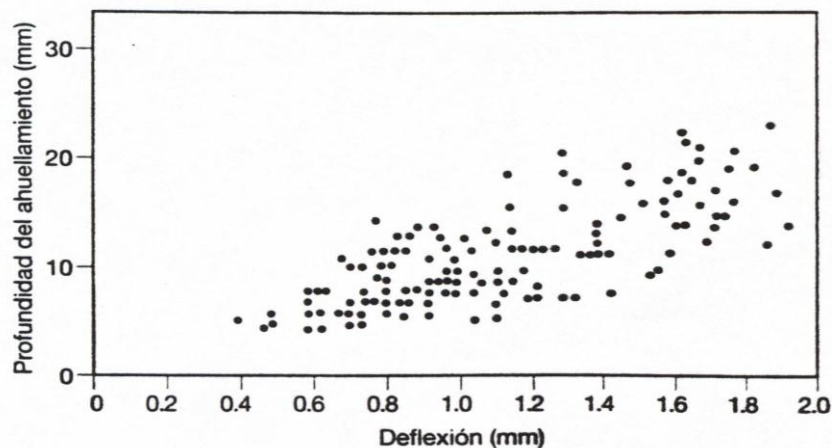
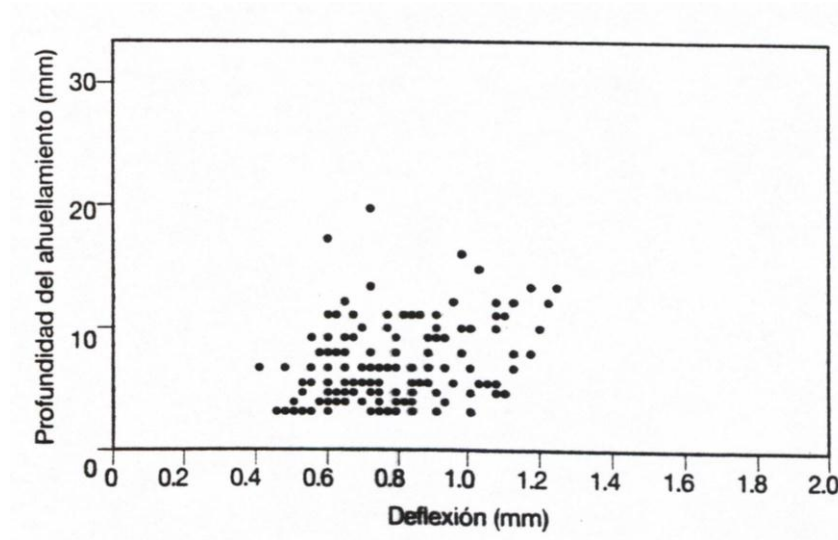


Fig. 5.10 b) Mala correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento.



PASO 5 Determinación del comportamiento del pavimento

El siguiente paso consiste en correlacionar lo encontrado en la investigación y utilizarlo para identificar y definir las causas de la falla del pavimento. A menudo es útil comparar los resultados de varias investigaciones y métodos de diseño. En esta etapa deben establecerse los trabajos adicionales que se requieren para entender completamente el comportamiento del pavimento. Por ejemplo, si los resultados encontrados son muy variables, habrá que realizar apiques y ensayos DCP adicionales.

En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y del TRRL se utilizan las medidas de deflexión de la superficie para determinar si la capacidad estructural del pavimento existente es la adecuada.

El método de diseño racional puede usarse también para determinar la capacidad estructural residual del pavimento fallado. El análisis racional del pavimento existente requiere los siguientes datos de entrada:

- Los espesores de las capas del pavimento;
- Los módulos elásticos derivados de los resultados de ensayos de laboratorio, de ensayos DCP y de medidas de la cuenca de deflexiones; y
- La relación de Poisson de los materiales de las diferentes capas del pavimento.

PASO 6 Diseño preliminar de la rehabilitación.

Después que se hayan entendido las causas de la falla, el siguiente paso en la metodología de diseño de pavimentos es determinar opciones preliminares de diseño de la rehabilitación. Pueden considerarse un rango de opciones. En este ejemplo se han contemplado las siguientes:

- La reconstrucción total del pavimento;
- La colocación de capas asfálticas;
- El reciclaje **in situ**.

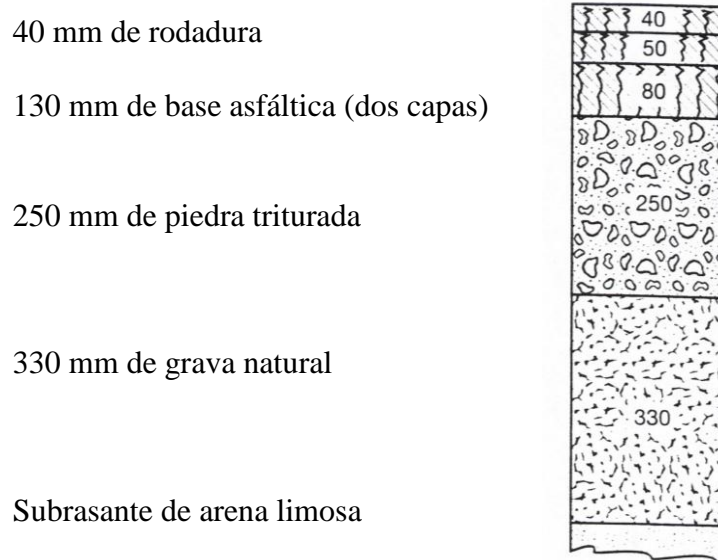
El diseño de los espesores de las capas del pavimento para estas alternativas con el tráfico de diseño debe realizarse mediante alguno de los procedimientos tratados, como por ejemplo los dados por el Instituto del Asfalto, el TRRL, o por el método de diseño racional. Culinado lo anterior, puede escogerse el diseño final del pavimento, con base en la evaluación económica de estas opciones.

La secuencia de la fase de diseño preliminar se explica con el siguiente escenario:

- Una sección de una autopista para tráfico pesado tiene fallas severas y presenta ahuellamientos y grietas.

- Durante las discusiones con las autoridades viales se concluyó que se requiere un diseño para diez años de vida útil. Durante este período se propone seguir un plan mínimo de mantenimiento.
- De acuerdo con la información analizada, se estima un tráfico de diseño de 10 millones de E.E.
- Las investigaciones indican que la capacidad estructural del pavimento existente está muy por debajo de la requerida para el tráfico de diseño, y que la parte superior del pavimento es débil.
- Los apiques muestran que el pavimento consiste según lo muestra la siguiente **Figura 5.11.**

Fig. 5.11 Pavimento existente según apiques.



Las tres opciones consideradas en la etapa de diseño preliminar que se muestran esquemáticamente en la **Figura 5.12** y se describen en detalle a continuación, tienen una capacidad estructural para un tráfico de diseño de 10 millones de E.E.

Opción 1: Reconstrucción del pavimento

En esta opción se considera remover toda la capa asfáltica agrietada (170 mm), descartándola, y compactar nuevamente la piedra triturada de la capa de base, sobre la cual se colocará una capa adicional de piedra triturada de 150 mm. Finalmente, se pondrán 80 mm de base asfáltica y 50 mm de capa de rodadura para completar el pavimento reconstruido. El costo estimado de esta opción es de US\$ 30,12 por m².

Opción 2: Colocación de capas asfálticas

Antes de colocar las capas asfálticas se removerán y parcharán las áreas localizadas que muestran fallas severas, como piel de cocodrilo o ahuellamientos. Se asume que el 12 % del área más dañada, se tratará mediante fresado hasta una profundidad de 90 mm, y luego se parchará con mezcla asfáltica. Una vez terminado este trabajo, el ancho completo del pavimento se cubrirá con una capa asfáltica de base de 80 mm y después con una capa de rodadura de 50 mm. El costo estimado de esta alternativa es de US\$ 20,40 por m².

Opción 3: Reciclaje profundo

El reciclaje profundo puede llevarse a cabo con el uso de agentes estabilizadores, entre ellos cemento, emulsión asfáltica o asfalto espumado. Un pequeño porcentaje de ce-

mento (generalmente 1,5 %) se usará en combinación con la emulsión asfáltica o con el asfalto espumado.

En la **Figura 5.12**, se describen las alternativas de reciclaje con agentes estabilizadores. Debe hacerse énfasis en que todas las alternativas tienen capacidades estructurales similares.

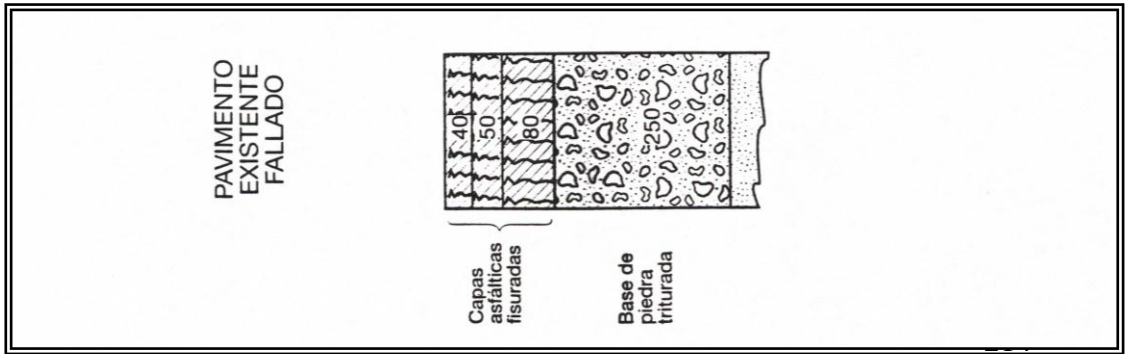
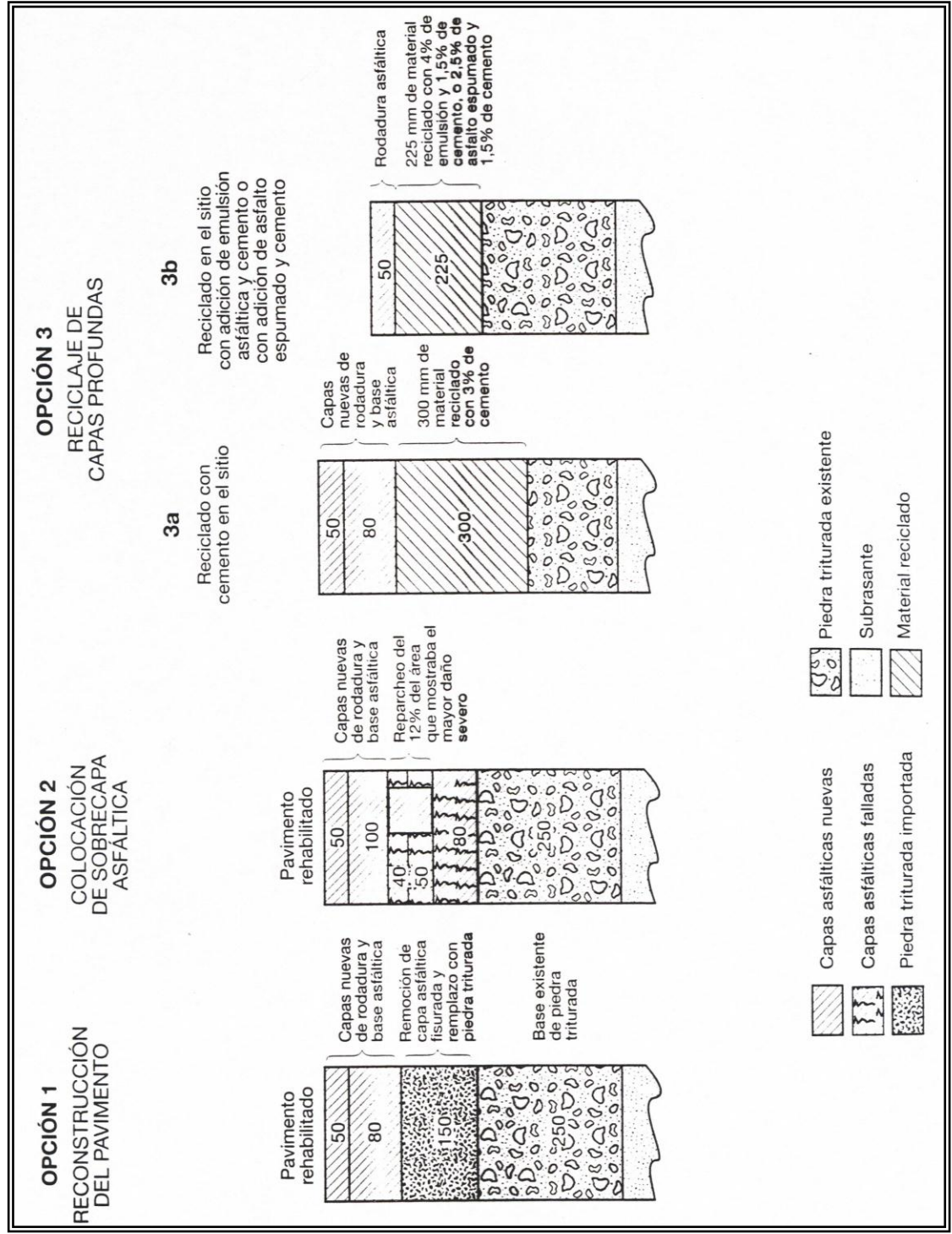
Opción 3a: Reciclaje con cemento

El pavimento existente se recicla hasta una profundidad de 300 mm, usando 3 % de cemento como agente estabilizador. Sobre la capa reciclada se colocará una capa de base asfáltica de 80 mm y una capa de rodadura de 50 mm de espesor. El costo estimado de esta alternativa es de US\$ 18,86 por m².

Opción 3b: Reciclaje con la combinación de emulsión asfáltica y cemento, o asfalto espumado y cemento

Se reciclan 255 mm del pavimento existente, usando una combinación de 4 % de emulsión asfáltica y 1,5 % de cemento, o de 2,5 % de asfalto espumado y 1,5 % de cemento. Sobre la capa reciclada se pondrá una capa de rodadura asfáltica de 50 mm de espesor. En este caso, los costos estimados por metro cuadrado son los siguientes: con emulsión asfáltica, US\$ 12,07, y con asfalto espumado, US\$ 10,72.

Fig. 5.12 Opciones de rehabilitación



PASO 7 Selección del diseño de la rehabilitación

En las comparaciones de costos tabuladas a continuación se indica que las opciones de reciclaje profundo son las más efectivas desde el punto de vista económico y que, por tanto, es importante investigar con mayor detalle el uso de este proceso.

La opción del reciclaje profundo con la combinación de asfalto espumado y cemento es la que tiene menor costo por metro cuadrado.

Tabla 5.11: Comparación de costos	
<i>Opción</i>	<i>Costo por m² (US\$)</i>
1. Reconstrucción del pavimento	30,12
2. Colocación de capas asfálticas	20,40
3. Reciclaje en frío con:	
• Cemento	18,86
• Combinación de emulsión asfáltica	12,07
o asfalto espumado	10,72

PASO 8 Diseños de mezclas en el laboratorio

La estimación preliminar de los costos se basó en hipótesis tomadas de experiencias previas relacionadas con los contenidos de estabilizador y con las propiedades de los materiales reciclados. El siguiente paso consiste en verificar dichas hipótesis desarrollando un trabajo apropiado de diseño de mezclas. En esta etapa es posible que tenga que incorporarse nuevo material para mejorar la gradación de la mezcla reciclada, o para elevar su calidad (por ejemplo, para disminuir la plasticidad).

PASO 9 Diseño final del pavimento

El diseño final del pavimento puede proponerse tomando en cuenta el contenido de estabilizador y las propiedades de la mezcla reciclada, así como el efecto que ésta tiene en el costo de la rehabilitación. Si es necesario mezclar algún agregado adicional, el costo extra del material debe considerarse en esta etapa para así estimar el costo final del trabajo.

5.4.1.2.2 Pasos para el diseño de reciclaje superficial o de capas delgadas.

PASO 1 Determinación de los requerimientos del propietario de la vía

Antes de entrevistarse con el propietario de la vía, resulta recomendable realizar una inspección visual con el propósito de ganar cierto conocimiento del tipo y nivel de fallas del pavimento. En esta etapa, es probable que el propietario esté enterado de que la calidad de la vía se ha deteriorado y que hay que tomar medidas para su rehabilitación. La decisión del propietario de la vía de realizar un reciclaje superficial puede basarse en el hecho de que las fallas sólo se restringen a las capas superficiales del pavimento, o en que debido a la falta de recursos únicamente puede costearse una estrategia de mantenimiento a corto plazo. Es muy importante que el propietario de la vía entienda que un reciclaje superficial no constituye un refuerzo sustancial del pavimento.

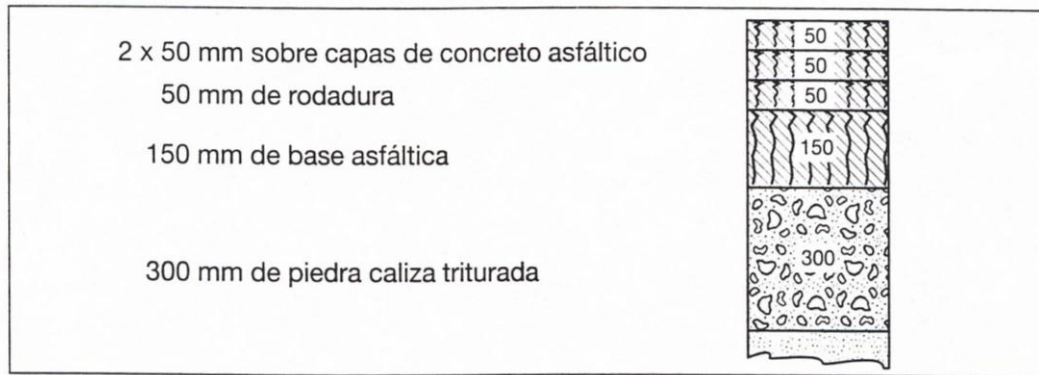
Durante las discusiones con el propietario de la vía, debe obtenerse la siguiente información:

- Los datos disponibles sobre el tráfico
- Los registros de mantenimiento del pavimento
- La información disponible del pavimento existente

- El tipo y posición de los servicios que pueden afectarse por la construcción
- Los problemas prácticos de construcción, como por ejemplo la acomodación del tráfico durante la construcción y las ayudas para el control del tráfico que se requerirán durante la etapa de investigación.

PASO 2 Información disponible

Un ejemplo típico de los registros del propietario sería:



- Información de tráfico

En los casos en los cuales se trate el reciclaje superficial como una estrategia de rehabilitación a corto plazo, las tasas de crecimiento de tráfico y la vida remanente del pavimento no cumplen un papel muy importante. La información de tráfico se usa principalmente para planear la construcción, de tal manera que durante la misma pueda acomodarse el tráfico lo más eficientemente posible.

PASO 3 Investigación del pavimento

En el rango de métodos de investigación para el reciclaje superficial se cubren los siguientes aspectos:

- La investigación visual

- La verificación de espesores, generalmente mediante la toma de núcleos
- La toma de muestras, hasta la profundidad de reciclaje propuesta, para propósitos de diseño de mezclas

• **Inspección visual**

La inspección visual debe mostrar las áreas del pavimento que aún se encuentran intactas y cuáles presentan fallas evidentes.

En la inspección visual deben registrarse en detalle las diferentes formas de falla, con el objeto de analizarlas en términos de unos porcentajes de la longitud de vía.

En la **tabla 5.12** se muestra un ejemplo típico.

Tabla 5.12 Análisis visual de fallas				
<i>Modo de falla del pavimento</i>	<i>% de la longitud de la vía por ancho total que exhibe fallas severas</i>	<i>Criterio de comportamiento para cada modo de falla (% de la longitud de la vía)</i>		
		Intacto	Precaución	Severo
Agrietamiento	28	<5	5a15	>15
Deformación	7	<5	5a15	>15
Desintegración	10	<10	10a15	>15
Desgaste de la superficie	38	<20	20 a 40	>40

En este ejemplo puede observarse que el agrietamiento clasifica dentro de la categoría "severa" de criterios de comportamiento. La deformación, la desintegración (baches) y la

textura de la superficie entran en la categoría de "precaución". Estos son los resultados típicos de un pavimento que se beneficiaría con un reciclaje superficial.

La inspección visual detallada también ofrece la oportunidad de observar otros aspectos que necesitan atención, como por ejemplo deficiencias en el drenaje y daños en los hombros.

• **Toma de núcleos**

La toma de núcleos se realiza en sitios escogidos al azar a lo largo de la sección, para verificar los espesores de las capas asfálticas.

En la **tabla 5.13** se muestra un ejemplo típico de los resultados de la toma de núcleos.

<i>Tabla 5.13 Análisis del espesor de las capas</i>			
<i>Núcleo número</i>	1	2	3
<i>Distancia en kilómetros</i>	11000	11 400	11 800
<i>Carril</i>	Límite Norte	Límite Sur	Límite Norte
<i>Espesor de capa: Rodadura (mm)</i>	51	39	53
<i>Base</i>	150	156	149

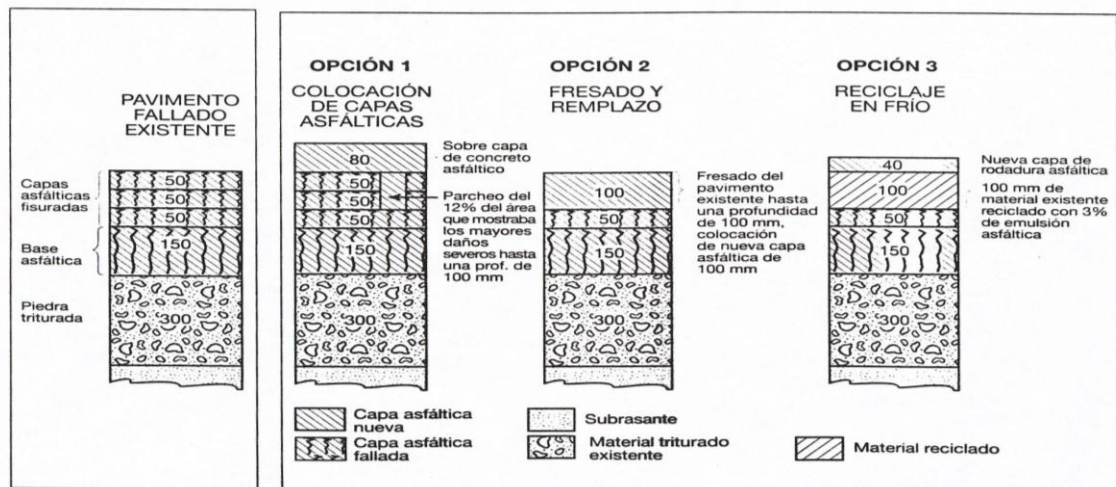
• **Muestreo para el diseño de mezclas**

Los núcleos son muy pequeños como para obtener material suficiente para un trabajo de diseño de mezcla. Las muestras para este propósito deben obtenerse por fresado, hasta la profundidad propuesta del reciclaje, de una sección corta del pavimento, empleando una máquina fresadora pequeña. La muestra obtenida de esta manera será similar a la encontrada cuando se usa una recicladora de escala real.

PASO 4 Opciones de rehabilitación

En la **figura 5.13** se ilustran tres opciones de rehabilitación con las cuales se obtiene, aproximadamente, la misma capacidad estructural.

Fig. 5.13 Opciones de rehabilitación para el reciclaje de capas delgadas.



Opcción 1 Colocación de capas asfálticas

Antes de colocar las capas asfálticas, es necesario reparar las áreas que muestran fallas severas, de otra manera, se podrá esperar la aparición de fallas aisladas con grietas reflejadas en superficie. En este ejemplo, se asumen el fresado y el parchado de un 12 % de la superficie hasta una profundidad de 100 mm.

Después que se hayan terminado estas reparaciones, se recomienda la colocación de una capa asfáltica, de 80 mm, a lo ancho de la vía.

Opcción 2 Fresado y reemplazo de las capas asfálticas falladas existentes

El pavimento existente se fresa hasta una profundidad de 100 mm y se reemplaza por 100 mm de mezcla asfáltica en caliente.

Opción 3 Reciclaje en frío

Esta opción se llevará a cabo reciclando 100 mm de espesor con 3 % de emulsión asfáltica. Sobre la capa reciclada se colocará una capa de rodadura asfáltica de 40 mm de espesor.

PASO 5 Comparación de costos

Como puede observarse a continuación, el reciclaje superficial es la opción más económica entre los costos estimados.

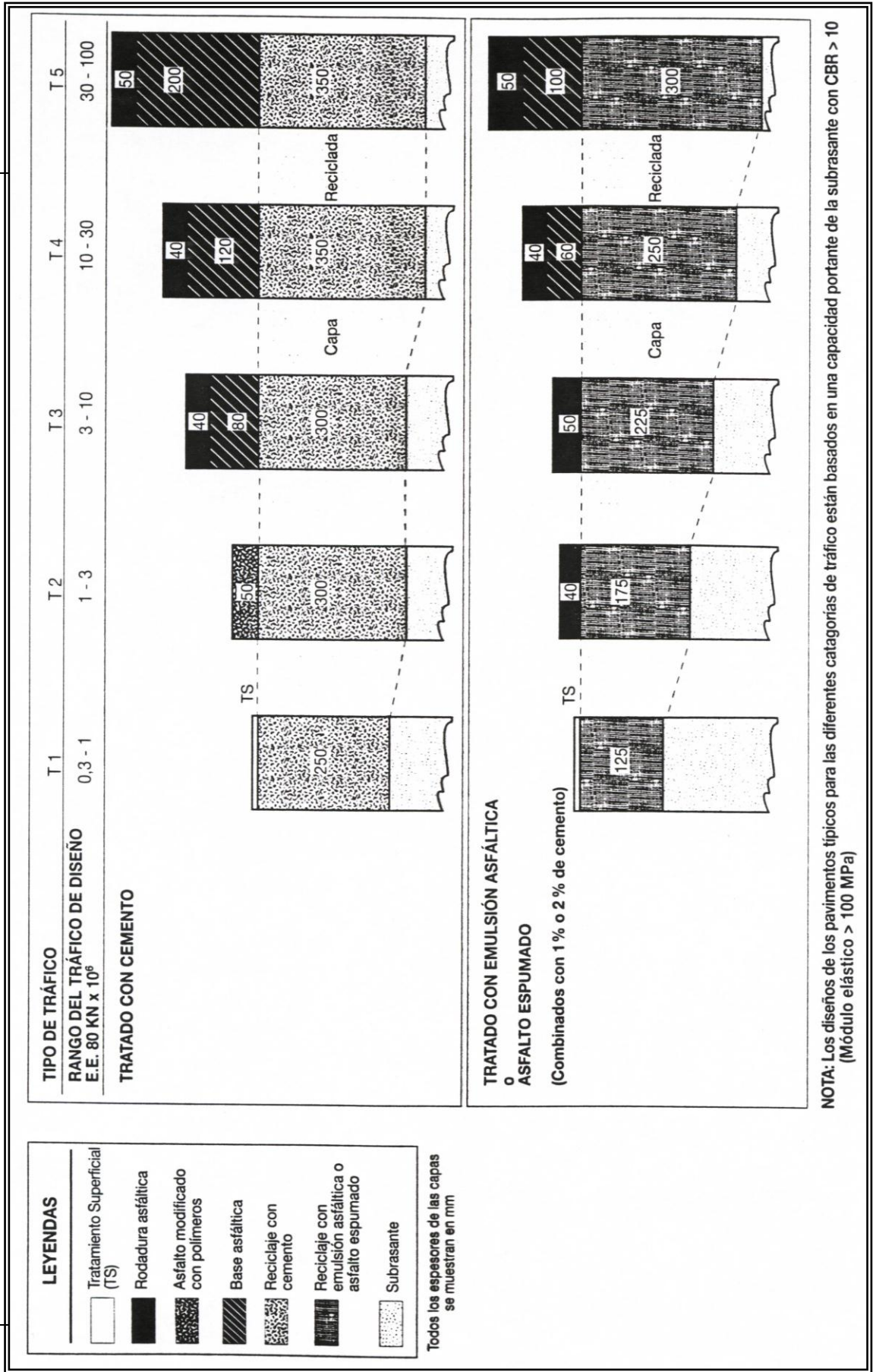
PASO 6 Diseño de mezclas en el laboratorio

El siguiente paso consiste en determinar el porcentaje que debe usarse de emulsión asfáltica, por medio de un diseño de mezcla en el laboratorio con una muestra de material fresado procedente de la vía. Antes de llevar a cabo el diseño de la mezcla, hay que establecer la granulometría de la muestra, con el objeto de determinar si se requiere la adición de material fino, como polvo de trituración, para mejorar su gradación.

PASO 7 Diseño final del pavimento

Ahora puede terminarse el diseño del pavimento. El costo estimado se ajusta, teniendo en cuenta el contenido de asfalto óptimo resultante del diseño de mezcla y los posibles incrementos en los costos por la adición de finos (polvo) de trituración.

Tabla 5.14 Catálogo de estructuras típicas de pavimentos reciclados



NOTA: Los diseños de los pavimentos típicos para las diferentes categorías de tráfico están basados en una capacidad portante de la subrasante con CBR > 10 (Módulo elástico > 100 MPa)

5.4.2 Enfoque para diseño según el Instituto del Asfalto²⁷

Este método de diseño esta basado en el uso de mezclas con emulsiones asfálticas, sin embargo se considera aplicable para mezclas con cemento asfáltico.

5.4.2.1 Procedimiento de diseño.

Se requiere un poco de conocimiento de los factores siguientes:

- **Clasificación de Trafico por EAL**, tipo de calle o carretera, o del volumen de camiones pesados (**Tabla 5.16**).
- **Soporte**, clasificado por el tipo, obtenido por el Modulo de Resiliencia, CBR o el valor de R de los datos de prueba (**ver Tabla 5.17**).
- **Tipo de mezcla**, clasificado como se indica debajo.

Se proporcionan cartas de diseño para dos tipos de mezclas y procedimientos de la construcción:

- ♣ **Tipo A-** Usando agregados semi-procesados, triturados sin cribar, en bruto como salen de la mina o bancos, mezclados en una planta central o móvil.
- ♣ **Tipo B-** Usando arenas o arenas limosas, mezcladas en plantas centrales, mezcladores de tambor o graduadores de motor.

Carta de Diseño **A-1** (métrico) o **A-2** (internacional) debe usarse para emulsiones asfálticas o cemento asfáltico de mezclas hechas en central o móvil con agregados de gradación **A, B, C** (**ver Tabla 4.2**) o **D** (semi-procesados, triturados, de cantera o banco). La carta de diseño **B-1** (métrico) o **B-2** (internacional) deberá ser usada para

²⁷ “TRADUCCIÓN LIBRE, y adaptado a la conveniencia del Documento”, extraído de ASPHALT COLD-MIX RECYCLING
Autor: THE ASPHALT INSTITUTE, manual series No 21 (MS-21), March 1983

emulsión asfáltica o cemento asfáltico para mezclas hechas usando planta central o móvil, mezcladores rotatorios o Graduadores de motor, usando la gradación **E**, **F**, y **G** (arena o arena limosa). Si ambos requisitos (agregados y métodos de construcción) no pueden ser cumplidos usar las cartas **B-1** o **B-2**.

Las cartas de diseño dan la combinación de espesores de una mezcla reciclada en frío base y una capa de superficie asfáltica. Los espesores mínimos recomendados de capa de superficie asfáltica a través de una mezcla reciclada en frío se dan en la **Tabla 5.18**. Una capa de superficie de concreto asfáltico o emulsión asfáltica de mezcla Tipo I²⁸ puede ser sustituido por una porción del espesor de asfalto emulsificado tipo A o B cuya mezcla ha sido obtenida de una carta de diseño. Cuando se usa una mezcla con emulsión asfáltica tipo I, se deberá usar un tratamiento simple o doble de superficie pero no deberá ser sustituido por cualquiera de los espesores obtenidos de una carta de diseño. Para condiciones de tráfico liviano, EAL es menor de 10^4 , una superficie tratada puede ser colocada directamente, pero no ser sustituida por, cualquier porción de el espesor de Tipo A o B las mezclas asfálticas emulsificadas obtenidas de una carta de diseño.

Las mezclas en frío de gradación densa normalmente tienen una resistencia baja a desmoronarse a bajo tráfico hasta que si no han sido totalmente curados, y lo mismo es siempre verdad para mezclas de arena. La capa de superficie asfáltica o superficie tratada proporciona protección contra los desmoronamientos y el desgaste de las llantas. Para pavimentar con propósitos, de emulsiones asfálticas dependerá de la evaporación de agua para el desarrollar las características de curado y de adherencia, ya que algunos

²⁸ Tipo I mezclas que son mezcladas en planta, diseñadas en laboratorio, mezclas de emulsiones asfálticas con agregados de gradación densa y que tengan propiedades similares al concreto asfáltico ver tabla 5.20.

tipos de emulsiones contienen cantidades ligeras de solventes de petróleo para ayudar en el proceso mezclado y curado. Mientras el solvente no entra directamente en el mecanismo de triturado, deben tomarse las precauciones necesarias para la evaporación del solvente con el objetivo de que la mezcla sea curada propiamente. Por consiguiente, una capa superficial o superficie tratada no deberá aplicarse hasta que el agua (y solvente, si se aplica) ha sido removida de la base.

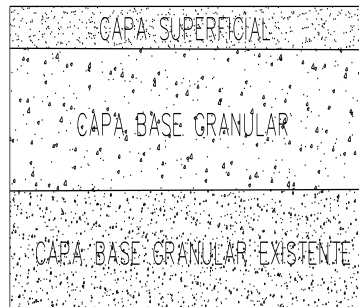
La siguiente definición se aplica al procedimiento de análisis de tráfico:

EAL es definido como el equivalente a 80 KN (18,000 libras) de carga aplicada por un solo eje. Este es el efecto del desempeño del pavimento de cualquier combinación de cargas de ejes de magnitudes variadas que equivalen al número de 80 KN (18,000 libras) de un solo eje, carga requerida para producir un efecto equivalente.

Se describen camiones pesados como los de eje doble, camiones de seis llantas o más. Pickup y camiones livianos de cuatro llantas no están incluidos.

Si una porción de una base vieja granular va a permanecer debajo de la base reciclada (**Figura 5.15**) las propiedades de los materiales de la base granular deberán ser evaluadas y asignarles equivalencias de capas apropiadas para usarlas en el diseño del espesor. Los factores de conversión están listados en la **Tabla 5.19**. El resto de la base o subbase deberá ser recompactada y comprimida si se dejara como agregado base. También, cualquier deficiencia de drenaje en la antigua estructura de pavimento antes del procedimiento de reconstrucción.

FIGURA 5.15



5.4.2.1.1 Tablas

TABLA 5.16

Clasificación del tráfico

Clase de tráfico	EAL	Tipo de Calle o Carretera	Rango Aproximado del número de camiones esperados para el periodo de diseño
I	5×10^3	- Parqueos, salidas. - Calles residenciales de Tráfico liviano. - Tráfico liviano en caminos agrícolas	$\leq - 7,000$
II	10^4	- Calles Residenciales - Caminos residenciales y rurales	7,000-15,000
III	10^5	- Calles Urbanas colectoras menores - Caminos Rurales colectores menores	70,000-150,000
IV	10^6	- Arterias urbanas menores y calles industriales livianas menores. - Colector rural mayor y carreteras arteriales menores.	700,000-1,500,000
V	3×10^6	- Autopistas urbanas, y otra carretera arterial principal. - Carreteras Interestatales rurales y carreteras arteriales principales.	2,000,000-4,500,000
VI	10^7	- Carretera Interestatales Urbanas - Algunos caminos industriales	7,000,000-15,000,000

TABLA 5.17

SUELO DE LA SUBRASANTE

Es deseable el uso de laboratorio para probar y evaluar las características de soporte de carga del suelo de la subrasante, Sin embargo, si el equipo de prueba de laboratorio no está disponible, pueden hacerse el diseño en base a una cuidadosa evaluación de campo por un ingeniero que pueda asignar el suelo de la subrasante a una de las categorías siguientes:

SUELO POBRE

Este suelo puede volverse bastante blando y plástico con la humedad. Incluyendo a ello que estos suelos contienen cantidades apreciables de arcilla y arenas finas. Los sedimentos gruesos y las arcillas arenosas pueden mostrar o producir propiedades pobres en áreas donde penetración del congelamiento es un factor.

Propiedades típicas: Modulo de resiliencia = 30 Mpa (4,500psi), CBR = 3, Valor R = 6.

SUELO MEDIO.

Estos retienen un grado moderado de firmeza bajo condiciones adversas de humedad. Incluidos en estos suelos están los limos arenosos y gravas arenosas que contienen cantidades moderadas de arcilla y sedimentos finos.

Propiedades típicas: Modulo de resiliencia = 80 Mpa (12,000psi), CBR = 8, Valor R = 20.

SUELO BUENO O EXCELENTE

Un buen suelo retiene una sustancial cantidad de su capacidad de soporte de carga aun húmedo. Incluidos están las arenas limpias y definidas, gravas bien graduadas y los suelos libres de desperdicios de materiales plásticos. Los suelos excelentes no son afectados por la humedad o el hielo.

Propiedades típicas: Modulo de Resiliencia = 170 Mpa (25,000psi), CBR = 17, Valor R = 43.

MODULO DE RESILIENCIA (Mr).

La prueba utilizada para evaluar las propiedades de tensión para diseñar el espesor del pavimento.

RADIO DE SOPORTE DE CALIFORNIA (CBR).

Una prueba utilizada para evaluar bases, subbases, y capas de rodaduras para diseñar el espesor del pavimento.

VALOR DE RESISTENCIA (Valor R).

Una prueba utilizada para evaluar bases, subbases, y capas de rodaduras para diseñar el espesor del pavimento.

TABLA 5.18 Espesores mínimos de capa de superficie sobre base reciclada en mezcla en frío.

Nivel de trafico (EAL) ^a	Espesores mínimos para capa de superficie	
	mm	(pulg.)
<104	x ^b	x ^b
104	50 ^c	(2) ^c
105	50 ^c	(2) ^c
106	75 ^c	(3) ^c
107	100 ^c	(4) ^c
>107	130 ^c	(5) ^c

^a Equivalente a 80KN (18,000 lb.) carga aplicada por eje simple.

^b Tratamiento doble o simple de la superficie.

^c Concreto asfáltico o emulsión asfáltica tipo 1 con tratamiento a la superficie.

TABLA 5.19 Factores de conversión.

Clasificación del material	Descripción del material	Factores de Conversión²⁹
A	Subgrado nativo en todos los casos	0.0
B	Subbase mejorada- predominantes materiales granulares podrían tener algún sedimento y arcilla pero tienen un I. P. de 10 o menor (subgrado mejorado = cualquier capa de material mejorada entre suelo de subbase nativo y estructura de pavimento)	0.0
C	Subbase o base granular razonablemente bien graduada, agregados duros con algunos plásticos finos y CBR no menor de 20. Use la parte superior del rango 0.1 si el I. P. es 6 o menor, la parte baja de 0.2 del rango si el I. P. es más de 6.	0.1 – 0.2

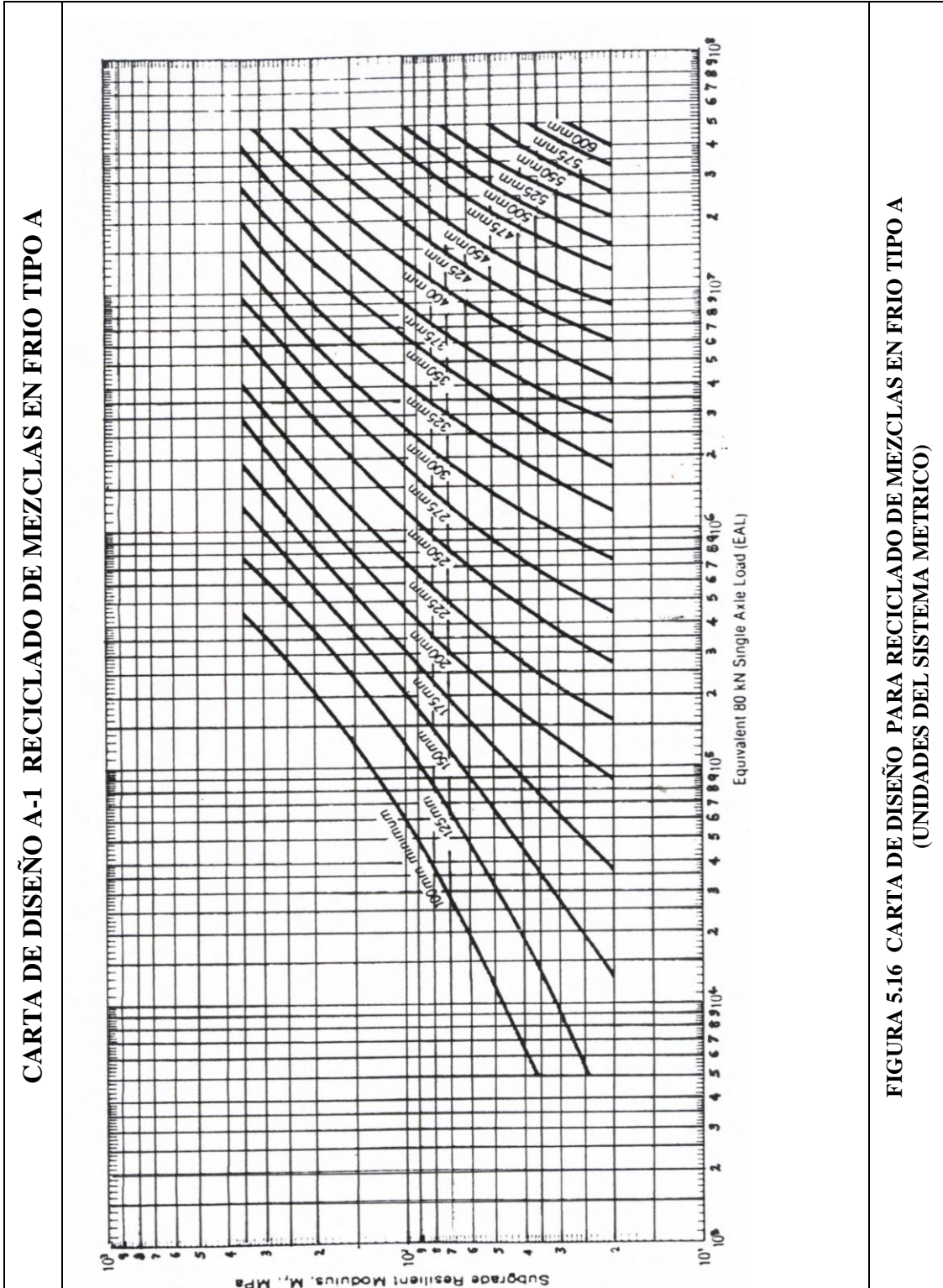
Estos factores de conversión aplican solamente a la evaluación de pavimentos de mezclas recicladas en frío. En ningún caso el diseño del espesor original.

²⁹ Valores y rangos de factores de conversión son factores multiplicadores de los espesores de las capas estructurales existentes que equivalen al espesor de la base reciclada en frío.

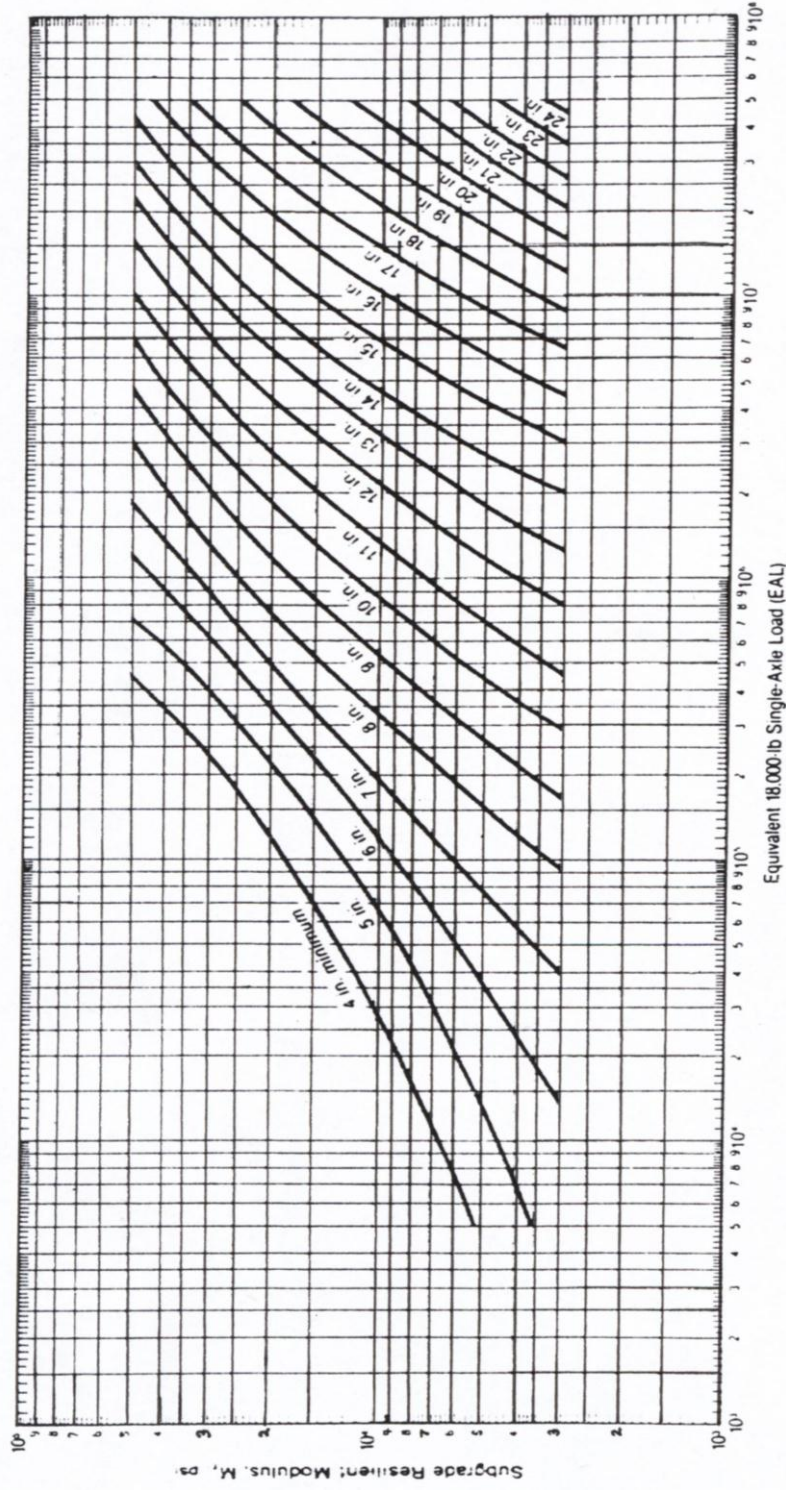
TABLA 5.20

Tamaño de malla		Gradación del porcentaje que pasa en peso	Mezclas procesadas de gradación densa				
50mm	2 in		100	-	-	-	-
38.1mm	1½ in		90-100	100	-	-	-
25.0 mm	3/8 in		-	90-100	100	-	-
19.0 mm	¾ in		60-80	-	90-100	100	-
12.5 mm	½ in		-	60-80	-	90-100	100
9.5 mm	3/8 in		-	-	60-80	-	90-100
4.75 mm	No 4		20-55	25-60	35-65	45-70	60-80
2.36 mm	No 8		10-40	15-45	20-50	25-55	35-65
1.18 mm	No 16		-	-	-	-	-
600 µm	No 30		-	-	-	-	-
300 µm	No 50		2-16	3-18	3-20	5-20	6-25
150 µm	No 100		-	-	-	-	-
75 µm	No 200		0-5	1-7	2-8	2-9	2-10
Porcentaje del Equivalente de arena			35 min.	35 min.	35 min.	35 min.	35 min.
Desgaste de los Ángeles @ 500 revoluciones			40 máx.	40 máx.	40 máx.	40 máx.	40 máx.

5.4.2.1.2 Cartas de diseño

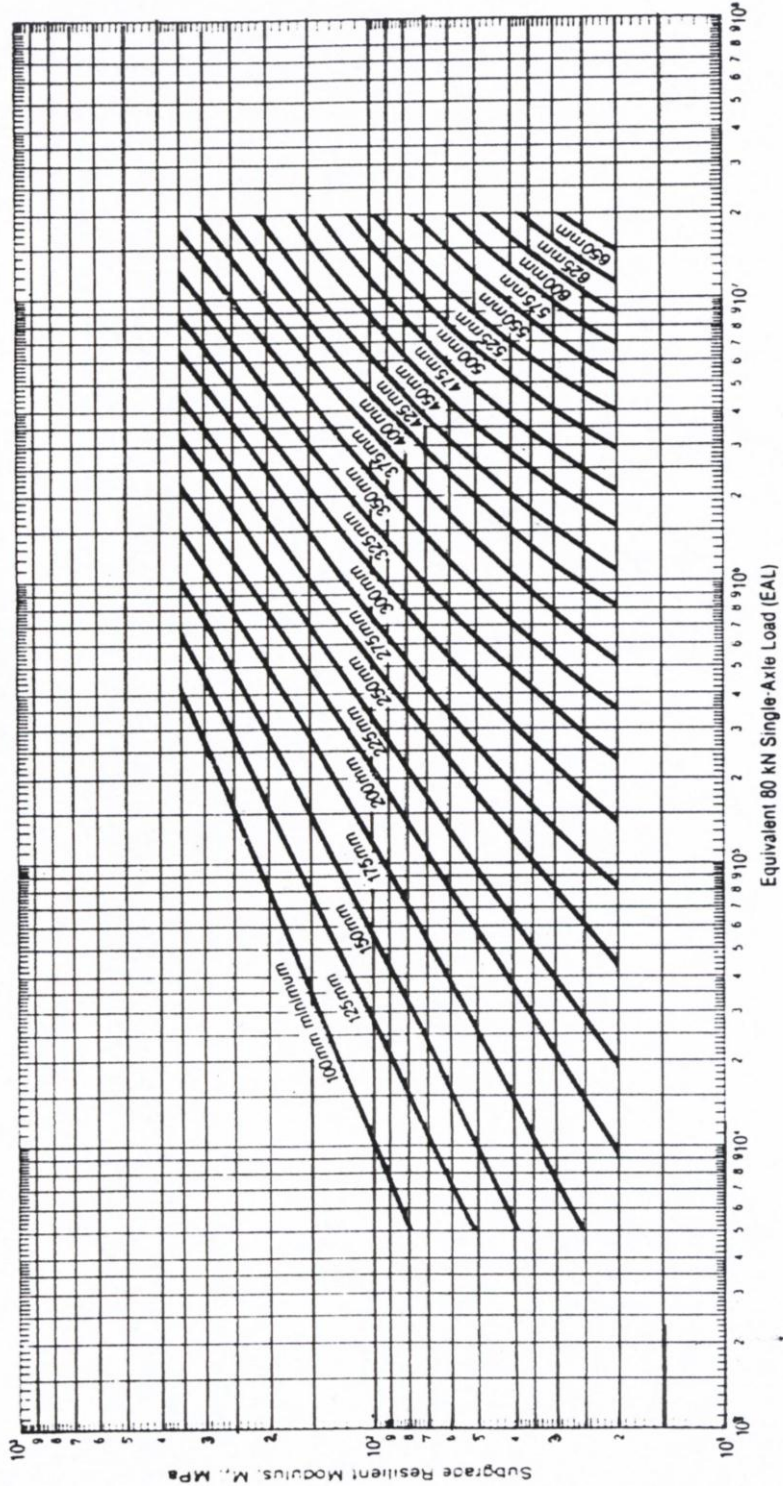


CARTA DE DISEÑO A-2 RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO A



**FIGURA 5.17 CARTA DE DISEÑO ESTANDAR PARA RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO A
(UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL)**

CARTA DE DISEÑO B-1 RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO B



**FIGURA 5.18 CARTA DE DISEÑO PARA RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO B
(UNIDADES DEL SISTEMA METRICO)**

CARTA DE DISEÑO B-2 RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO B

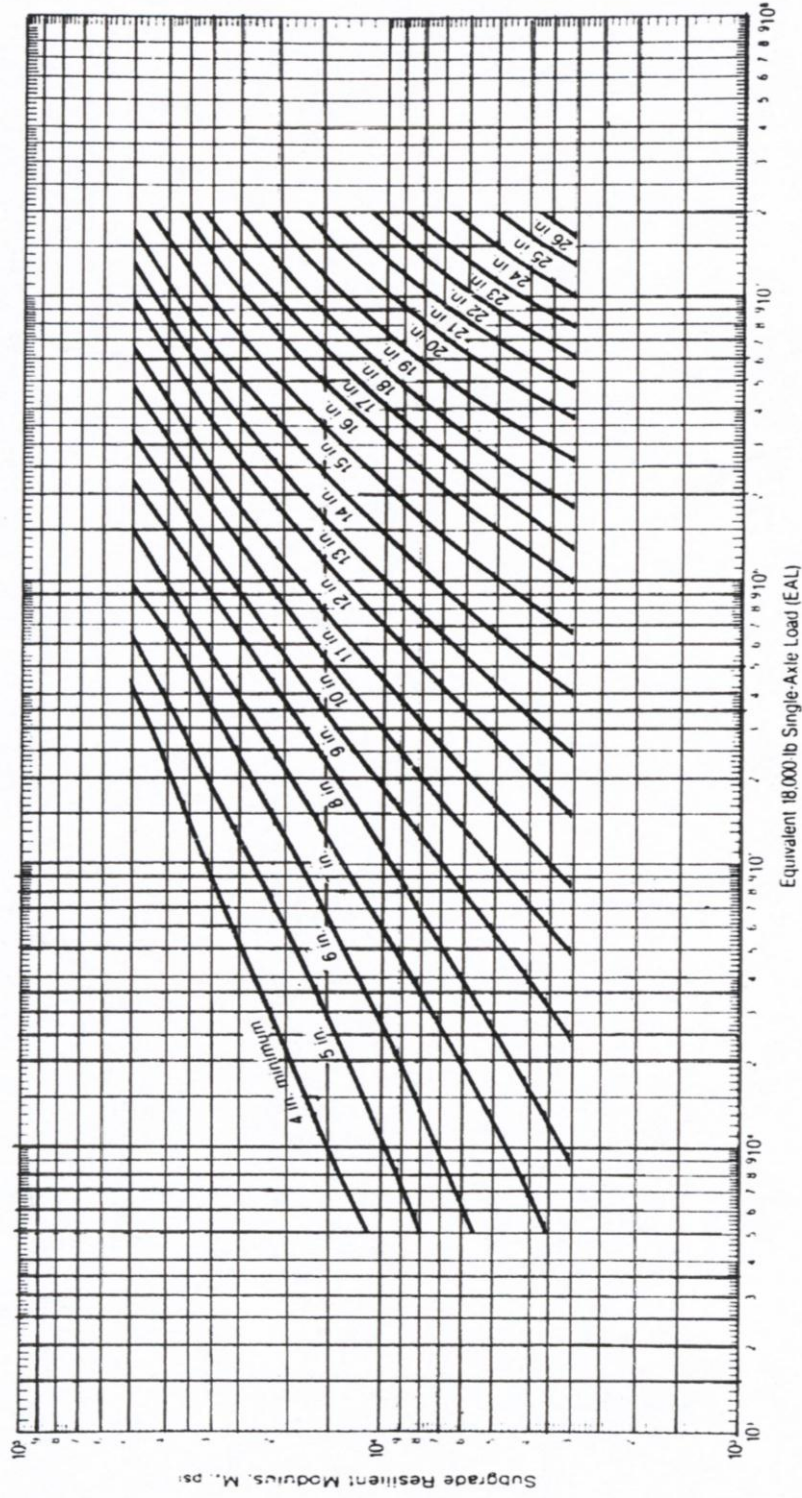


FIGURA 5.19 CARTA DE DISEÑO ESTANDAR PARA RECICLADO DE MEZCLAS EN FRIO TIPO B (UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL)

5.5 EJEMPLOS DE DISEÑO.

Los ejemplos mostrados son con condiciones asumidas y tienen como objeto la aplicación de la teoría, gráficos y tablas vistos en las secciones anteriores, por lo que cabe mencionar que cada proyecto presenta condiciones propias y a veces únicas, por lo que se hace necesario las investigaciones y acoplarse a las condiciones que se presenten.

5.5.1 Ejemplo de diseño según Wirtgen

En el siguiente ejemplo se muestran la aplicación de todos los procedimientos anteriores para llegar al diseño de un pavimento, contando ya con la información requerida acerca del tráfico y el periodo de diseño.

Información del tráfico:

- Período de diseño (años) = 10
- Número de vehículos pesados por día = 3000
- Número de E.E. de 80 kN por vehículo pesado = 2
- Tasa de crecimiento del tráfico (% , compuesto) = 4

<i>Clasificación</i>	<i>Tráfico de diseño</i> $80 \text{ KN} \times 10^6$
T1	0.3 a 1
T2	1 a 3
T3	3 a 10
T4	10 a 30
T5	30 a 100

La selección de la estructura apropiada del pavimento puede desarrollarse estimando primero el tráfico de diseño a partir de la **Tabla 5.15**, de la **Tabla 5.21** se selecciona la clasificación del tráfico.

Finalmente, de la **Figura 5.14** pueden tomarse las alternativas de las capas recicladas tratadas, ya sea con cemento o asfalto.

En la **Tabla 5.15** se lee que el tráfico de diseño es de $27,35 \times 10^6$ E.E. Por tanto, puede usarse como guía preliminar una estructura de pavimento en la clasificación de tráfico T4, en cuanto a la profundidad del reciclaje y los espesores de las capas asfálticas que se requerirán para alcanzar los requerimientos del diseño.

5.5.2 Ejemplo de diseño según el Instituto del Asfalto

Asuma las siguientes condiciones:

En la subbase: **Mr**: 30 Mpa (4,500 psi), **CBR** = 3, **Valor R** = 6 (ver **tabla IV-2**).

Trafico de diseño: **EAL** = 10^5

Gradación del combinado de agregados (triturado, semi-procesados, de mina o de banco).

Desarrollo.

- Podemos diseñar con la carta **A-1**(Sistema Métrico) o **A-2** (Sistema Internacional)de las cuales se obtiene el combinado de espesores de la base y la superficie, teniendo como datos de entrada el Mr y el EAL,

De las gráficas obtenemos un espesor de 190 mm = 7.5 pulg

- La **Tabla 5.18** establece, los espesores mínimos de la capa superficial, la cual para el caso resulta ser de **50 mm** (2 pulg.) si entramos con un $EAL = 10^5$
- La diferencia entre la combinación de espesores y el espesor mínimo de la capa superficial será el espesor de la base a reciclar.

$$190 \text{ mm (7.5 pulg)} - 50 \text{ mm (2 pulg)} = 140 \text{ mm (5.5 pulg)}.$$

5. 5.3 Ejemplo de diseño, basado en el método de la AASHTO.

No se profundiza en lo referente al método AASHTO ya es presentado a detalle en el capítulo 6, sección 6.2 en donde aparece su aplicación completa, el uso de tablas y nomogramas para determinar:

El número estructural NS para el periodo de diseño a través de nomograma o de la siguiente fórmula dada en la sección 6.2.3.5.1:

$$\log W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log M_R - 8.07$$

Debido a que el método de la AASHTO se basa en el número estructural (NS) para determinar los espesores de capa, se hace necesario determinar cual es el número estructural que presenta la vía a rehabilitar (NS_{ef}) y la diferencia de ellos dará como resultado el NS requerido para el periodo de diseño:

Ejemplo; asuma las siguientes condiciones para un pavimento a rehabilitar:

NS de requerido para el periodo de diseño de diseño = 4.01 (de formula sección 6.2.3.5.1)

NS efectivo presentado por el pavimento a rehabilitar = 2.1 (de ensayos de laboratorio y métodos de investigación como (FWD))

$$\checkmark \Delta NS = 4.01 - 2.1 = 1.91$$

De la tabla 6.8 tomamos la aportación de número estructural de (a_i /pulg.):

$$\checkmark \text{Carpeta asfáltica: } 0.30-0.44$$

$$\checkmark \text{Base según el agente estabilizador a utilizar (cemento): } 0.15-0.20$$

Se necesita ganar un NS = 1.91, para suplir esta demanda de numero estructural se adopta un valor del rango de aportación de la base y la carpeta para el caso 0.4 y 0.18 respectivamente.

La estructura del pavimento podría ser:

$$150 \text{ mm de base reciclada} \longrightarrow 5.9 \text{ pulg.} * 0.18/\text{pulg.} = 1.06$$

$$55\text{mm de carpeta asfáltica} \longrightarrow 2.16 \text{ pulg.} * 0.4 / \text{pulg.} = \underline{0.86}$$

$$1.92 \geq 1.91 \text{ de NS requerido}$$

Estructura final del pavimento: Reciclar y estabilizar con cemento 150 mm

Colocar una carpeta asfáltica de 55 mm

CAPITULO VI

DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO RECICLADO EN CALIENTE

6.0 DISEÑO DEL ESPESOR DEL PAVIMENTO PARA RECICLADO EN CALIENTE.

El procedimiento para diseñar el espesor para una estructura de pavimento, utilizando mezclas recicladas en caliente no es esencialmente diferente al que se requiere para un pavimento en cual se utilizan todos los materiales nuevos. Ya que el reciclaje de pavimentos en caliente es superficial, es decir no se recicla más de 5 cm. Es por esto que lo que se diseña es la mezcla nueva (tratada en el capítulo 4), a colocar por lo tanto para el diseño del espesor total del pavimento no cambia.

Cuando se recicla en caliente in-situ no se diseña un espesor total de pavimento, ya que la maquina no lo permite. Por lo que se aclara que el pavimento no debe poseer daños estructurales o daños profundos, ya que de lo contrario no seria aplicable el método in-situ y debe evaluarse otros métodos.

Pero en este capítulo se diseñará un pavimento de espesor total para así poder comparar las propiedades que debe tener un pavimento que va a ser reciclado en caliente in-situ, ya que el reciclaje de pavimentos en caliente no da un refuerzo estructural, sino que solamente da un mejor confort para el usuario de la vía.

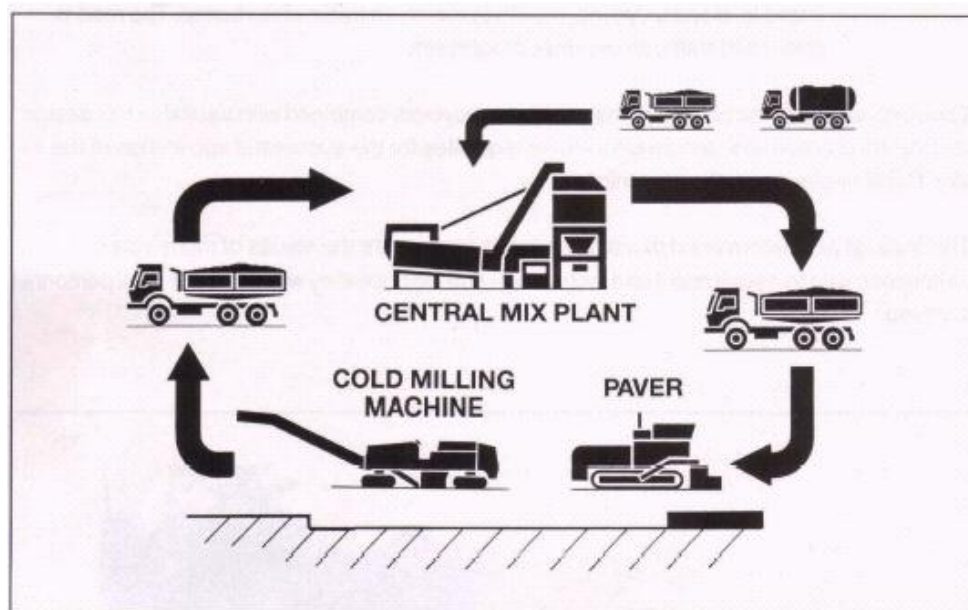
Cualquier deficiencia en el drenaje de la estructura del pavimento viejo debería ser corregida antes de proceder con la reconstrucción, si cualquier porción de la subbase o la base es conservada, las propiedades de estos materiales deberán ser evaluados y posteriormente revisados los coeficientes asignados al diseño del espesor de cada capa.

6.1 MÉTODOS DE RECICLADO.

Para fácil referencia, las técnicas de reciclado son definidas y referidas a términos comunes internacionales.

La definición de todas las técnicas de reciclado es gobernada por el lugar donde se realiza el reciclado del material. Básicamente, la industria diferencia entre las siguientes:

A) Reciclado en Planta Central



Representación diagramática del manejo del material cuando se recicla en planta central

Como se puede derivar del término mismo, el asfalto a ser re-usado es:

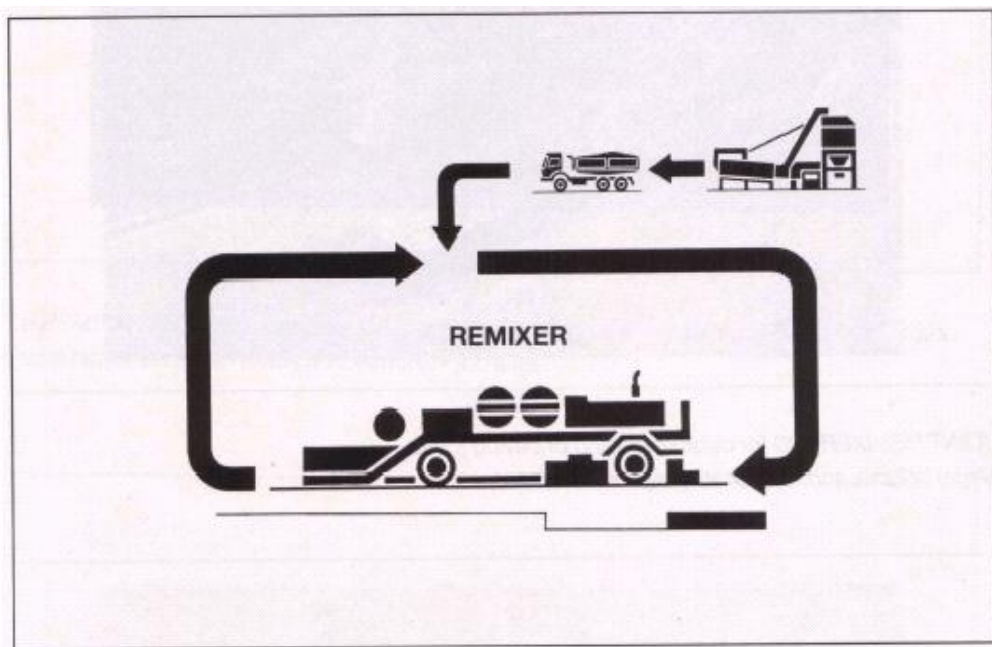
- fresado en frío, o
- escarificado en caliente, o
- quebrado, Ej.: con ripper

y subsecuentemente transportado a la planta central de mezclado donde es almacenado para el reciclado.

El material de pavimento asfáltico quebrado requiere triturado y cribado antes del reciclado en la planta central, mientras que el fresado en frío produce un material granulado que puede ser incorporado directamente.

La cantidad de material recuperado que puede ser introducido en la planta central de mezclado es determinada por ensayos de laboratorio. Los porcentajes usualmente varían entre 20% y 50% dependiendo de cuan envejecido este el pavimento.

B) Reciclado en sitio



Representación diagramática del manejo del material cuando se recicla en el sitio

Cuando se recicla en el sitio, un tren de equipo móvil calienta y escarifica el pavimento asfáltico existente, adiciona bituminoso o un agente rejuvenecedor, y/o una mezcla caliente virgen, como se estableció previamente; la mezcla reciclada es, entonces, colocada en el mismo paso de máquina.

Para mayor conocimiento del diseño de pavimentos asfálticos en caliente se presentan a continuación los dos tipos de diseño más utilizados, Método AASHTO y el Método del Instituto del Asfalto³⁰.

6.2 GUIA AASTHO PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS, 1993.

6.2.1 Introducción.

La información que AASHTO proporciona es utilizada para elaborar los criterios y procedimientos de diseño estructural de pavimentos, este método de diseño se desarrolló basado en las ecuaciones de regresión de comportamiento de pavimentos en las pistas de ensayo AASTHO (Prueba de Camino ó Road Test).

Basándose en lo anterior, se da una guía que indica cada paso de todo lo necesario para poder obtener datos que pueden ser introducidos a ecuaciones o programas de computación y obtener resultados satisfactorios.

Esta guía de diseño va orientada básicamente a pavimentos flexibles, pero el método también es aplicado a pavimentos rígidos, los cuales están fuera del alcance de este estudio.

6.2.2 Antecedentes

En años anteriores (década de los 20), los pavimentos se diseñaban sin pruebas de laboratorio, sólo se tomaba en cuenta la experiencia y el sentido del proyectista, lo cual generaba que los resultados a veces fueran dudosos. Un caso claro de falla en resultados

³⁰ Extraído de la tesis Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO 93 y el Instituto Americano del Asfalto 91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Autor: Jaime Ernesto Carvajal.

se daba cuando los datos eran utilizados para zonas de diferente tipo de suelos, diverso tráfico y distinto clima.

En esta época lo que se buscaba era proteger la subrasante de tensiones excesivas, colocando un espesor suficiente de material por encima de ésta (método utilizado en la Mecánica de Suelos).

Otro método utilizado en años pasados era el de Índice de Grupo, el cual nos dice que para subrasantes con alto índice de Grupo les correspondía grandes espesores de pavimentos.

El problema de éste método es que no especificaba cargas por eje, simplemente tenía en cuenta el número de vehículos pesados por día.

Así, como los dos métodos mencionados anteriormente, existen otros de igual importancia, los cuales son:

- Métodos Edafológicos.
- Métodos Basados en la Resistencia.
- Métodos del valor Soportante California (CBR).
- Método del Valor R de Hveem.
- Métodos Basados en Ensayos de Carga-Deformación.
- Métodos Basados en Ensayos Triaxiales.

Después de los años veinte se empieza a estudiar y a determinar que las cargas de tránsito y su distribución por ejes eran uno de los factores fundamentales en el diseño de pavimentos. A raíz de esto se comienzan a realizar los caminos de prueba, entre los que podemos mencionar:

- Prueba del camino de Bates.
- Prueba del camino de Maryland.
- Prueba del camino de la WASHO.
- Prueba del camino de la AASHO³¹.

Este último ensayo fue el más completo, el cual introdujo el concepto de servicibilidad en el diseño de pavimentos.

La servicibilidad es una medida de la capacidad del pavimento para brindar una superficie lisa y suave al usuario.

De estos estudios anteriores se obtuvieron datos bastantes confiables pero adolecía de ciertos defectos como considerar: un único medio ambiente, el mismo tipo de subrasante y materiales para pavimentos.

A raíz del vacío dejado por el ensayo anterior, el método de diseño AASHO tenía éstas limitaciones:

1. Verificación.
2. Base de datos estadísticos inadecuados.
3. Definiciones no reales de falla.

En los años de 1972 y 1981 se publicaron versiones provisionarias de la guía AASHTO.

Aunque en 1981 no hubo cambios en este rubro con respecto a 1972.

La ecuación de diseño de la guía AASHTO-72 era:

³¹ Ahora AASTHO.

$$\text{Log } W_{18} = 9.36 \log (SN + 1) - 0.20 + \frac{G_1}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + \frac{1}{F_R} + 0.372 (S, -3, 0)$$

$$\text{Siendo } G_1 = \log \frac{(4.2 - P_1)}{(4.2 - 1.5)}$$

En el año de 1986 se publicó una versión la cual presentaba muchas innovaciones, entre las que podemos mencionar:

- Aparece el concepto de confiabilidad de diseño, que permite al proyectista diseñar un pavimento con un nivel apropiado de riesgo.
- Se introduce el Módulo de Resiliencia en sustitución del CBR de la subrasante como dato de entrada. Esto permite hacer una mejor definición de las propiedades de los materiales.
- El Módulo de Resiliencia puede aplicarse también a materiales estabilizados y no estabilizados.
- Las condiciones de drenaje están tomadas en cuenta con los coeficientes de drenajes m_i . Estos son función de la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo que la estructura estará sometida a niveles de humedad próximas a la saturación.
- También considera los efectos ambientales, como condiciones de humedad y temperatura, prevé el efecto de hinchamiento por subrasantes expansivas y el efecto de hinchamiento por congelación.

6.2.3 Procedimientos de diseño de pavimentos flexibles.

6.2.3.1 Variables de entrada o diseño.

Se describen a continuación las variables de diseño a considerar en el método AASHTO.

Estas variables de diseño se deben de considerar para el diseño y construcción de cualquier tipo de pavimento las cuales son:

- Variables de Tiempo.
- Capacidad Soportante de la Subrasante.
- El Tránsito.
- Confiabilidad.
- Efectos Ambientales.

6.2.3.1.1 Variables de tiempo.

Aquí se debe de considerar las restricciones en el tiempo que de cualquier forma afectan el diseño de pavimentos. Se tiene que seleccionar los períodos de diseño y análisis ya sea para pavimentos de alto o bajo tránsito.

El período de diseño (comportamiento) es el período de tiempo transcurrido, en el cual una construcción o rehabilitación se determina desde su serviciabilidad inicial hasta su serviciabilidad final, momento donde requiere una rehabilitación.

Es importante que se seleccionen los límites mínimos y máximos del período del diseño basados en factores como; clasificación funcional de pavimentos, fondos disponibles para una inversión inicial, tiempo de duración de una obra nueva, políticas y

experiencia de la agencia diseñadora.

El período de diseño máximo es el mayor espacio de tiempo que se puede esperar que dure cierta alternativa; la selección de los períodos de tiempo largo pueden generar la creación de diseños no reales, si se requiere efectuar un análisis de costos apropiados en el período de diseño máximo de un tipo determinado de pavimentos.

El período de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir o el tiempo definido para fines de evaluación económica con el objetivo de hacer una comparación de alternativas. Puede ser igual que el período de diseño, pero en casos donde se prevén reconstrucciones a lo largo del tiempo, el período de análisis comprende varios períodos de diseño, el del pavimento original y el de distintas rehabilitaciones.

El período de análisis debe ser seleccionado de manera que incluya por lo menos una rehabilitación. Generalmente se toma un período de análisis de 20 años.

Los períodos de análisis recomendados según el tipo de vialidad son los mostrados en la

Tabla 6.1

TABLA 6.1	
<i>TIPO DE CAMINO</i>	<i>PERIODO DE ANÁLISIS (AÑOS)</i>
ALTO TRAFICO URBANO	30-50
ALTO TRAFICO RURAL	20-50
BAJO TRAFICO PAVIMENTADO	15-25
BAJO TRAFICO NO PAVIMENTADO	10-20

6.2.3.1.2 Subrasante.

Las propiedades de los suelos de subrasante es una de las variables de entrada más importantes en los diseños de pavimentos. Estas propiedades siempre estarán presentes aunque la subrasante sea estabilizada, compactada, etc.

Para conocer estas propiedades es necesario un muestreo muy amplio que abarque todo lo largo del proyecto. Las muestras son llevadas al laboratorio para ser ensayadas (granulometría, humedad, límites de Atterberg, contenido de humedad óptimo, CBR y clasificación). Todos estos datos constituyen una herramienta fundamental para el comienzo del proyecto.

A) Clasificación de los Suelos.

La clasificación de los suelos nos indica las propiedades físicas de los suelos. La clasificación que mejor se adapta para reflejar las propiedades de un suelo como subrasante es la de AASHTO. Sus variables de entrada son la granulometría y plasticidad.

En general un suelo, de acuerdo a su granulometría, se divide en:

- Grava: tamaño < 76.2 mm. (3") hasta tamiz No 10 (2 mm).
- Arena Gruesa: tamaño < 2 mm. hasta tamiz No 40 (0.425 mm).
- Arena Fina: tamaño < 0.425 mm. hasta tamiz No 200 (0.075 mm).
- Limos y Arcillas: tamaños menores de 0.075 mm.

Según AASHTO, un suelo fino tiene más del 35% que pasa el tamiz No 200 y se denominan A-4, A-5, A-6 ó A-7.

Dos suelos finos con granulometrías muy similares pueden tener propiedades diferentes según su plasticidad, la cual es analizada sobre la fracción que pasa el tamiz No 40. Esta propiedad es analizada con los límites de Atterberg.

En Ingeniería de Carreteras sólo interesan el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), cuya diferencia es el índice de plasticidad, que nos indica la plasticidad del material, o sea el rango de humedad dentro del cual el suelo puede ser amasado.

Resumiendo, se puede decir que para suelos gruesos la propiedad más importante es la granulometría, mientras que para suelos finos es la plasticidad.

La Figura 6.1 se ve la ubicación de los distintos suelos finos, de acuerdo al gráfico de plasticidad de la AASHTO.

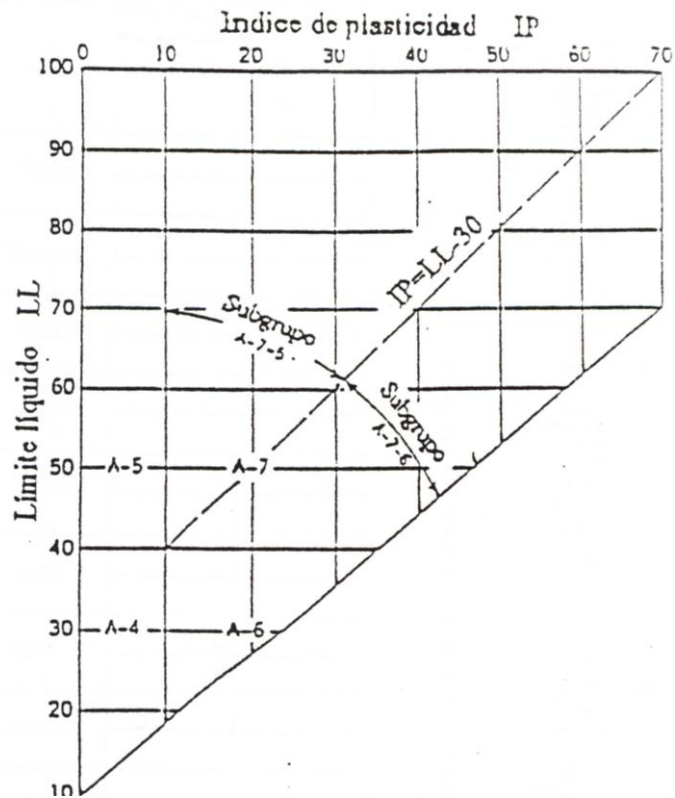


Figura 6.1 Gráfica de Plasticidad de la AASHTO

B) Relación entre Humedad y Densidad.

La relación entre la humedad y la densidad para un suelo compactado es muy importante en las propiedades del mismo. Se tienen los ensayos Proctor T- 99 (estándar) y T-180 (Modificado), los cuales permiten determinar la humedad óptima, es decir la humedad a la que el suelo alcanza su densidad máxima y por lo tanto presenta sus mejores propiedades mecánicas. Del valor de esta humedad óptima depende la energía de compactación brindada al suelo, en caso de incrementarse, la humedad óptima será menor y la densidad seca máxima mayor, corriéndose el pico de la curva hacia arriba y a la derecha de la Figura 6.2.

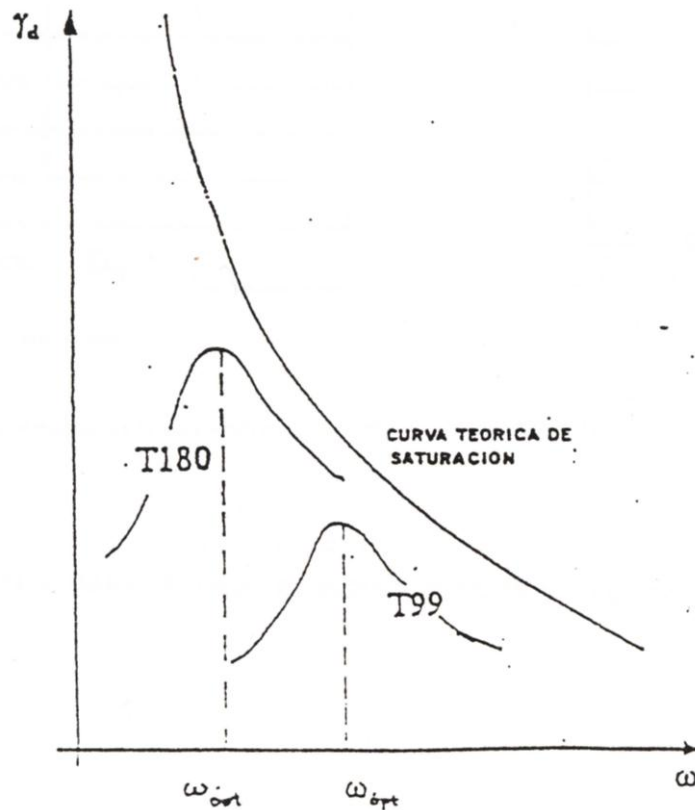


Figura 6.2 Curvas Humedad – Densidad de Proctor

C) Valor de Soporte California.

Mide la resistencia del suelo a la penetración de un pistón de 3 pulg² de área en una probeta de suelo, la fuerza requerida para forzar el pistón dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración. Estas fuerzas se comparan con las necesarias para producir iguales penetraciones en una muestra patrón que es una piedra partida bien graduada. El CBR es por definición:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga que produce una penetración de 2.5 mm en el suelo}}{\text{Carga que produce una penetración de 2.5 mm de la muestra patrón}}$$

Y se mide en porcentaje, el cual es muy variable, 2 a 3% para arcillas plásticas, a 70% o más para materiales granulares de buena calidad.

D) Módulo de Resiliencia en el Diseño de Pavimentos.

En el nuevo método AASHTO (1986 y 1993), el Módulo Resiliente reemplaza al CBR como variable que caracteriza la subrasante, sub-base y base. El procedimiento de diseño de pavimento flexible de la AASHTO requiere la entrada de un Módulo de Resiliencia Efectivo (M_R) del suelo de la subrasante, equivalente al efecto combinado de todas las variaciones que sufre el módulo debido a la acción del clima.

Cuando es de esperar que la subrasante tenga contenidos de humedad variables a lo largo del año, es necesario hacer un estudio de las variaciones del M_R con la humedad para determinar un M_R promedio de diseño. A continuación se describe el procedimiento de cálculo:

- La variación del Módulo de Resiliencia efectivo durante diferentes épocas del año se debe evaluar para cuantificar el daño relativo que sufre el pavimento en cada estación climatológica del año y poder determinar el daño total en el diseño del pavimento.

Estos valores pueden ser calculados de las siguientes formas:

1. Se hacen ensayos en laboratorio de Módulo de Resiliencia sobre muestras representativas de suelo bajo condiciones de tensión y humedad que simulen las que tienen lugar a lo largo del año. Con esto se establece una relación de laboratorio entre Módulo Resiliente y contenido de Humedad.

2. Se determina el Módulo de Resiliencia in situ en función de las deflexiones medidas en pavimentos para las diferentes estaciones del año. Este módulo Resiliente se ajusta para estudiar la posible diferencia entre resultados de laboratorio o in situ.

3. Se pueden estimar valores normales (o de verano de M_R en función de las propiedades conocidas del suelo y usar relaciones empíricas para estimar las variaciones estacionales). En USA el M_R por deshielo en primavera es de un 10 a 20% de un M_R normal y el correspondiente al suelo congelado es de dos órdenes de magnitud mayor que el normal.

4. Dividir el año en períodos en los cuales M_R es constante. Este período no debe ser menor de 15 días.

5. Con Cada valor de M_R se determina, mediante el ábaco de la Figura 6.3, el valor del daño relativo (u_f) para cada estación o bien puede usarse la siguiente ecuación:

$$u_f = 1.18 \times 10^8 \times M_R^{-2.32}$$

Donde M_R esta expresado en psi.

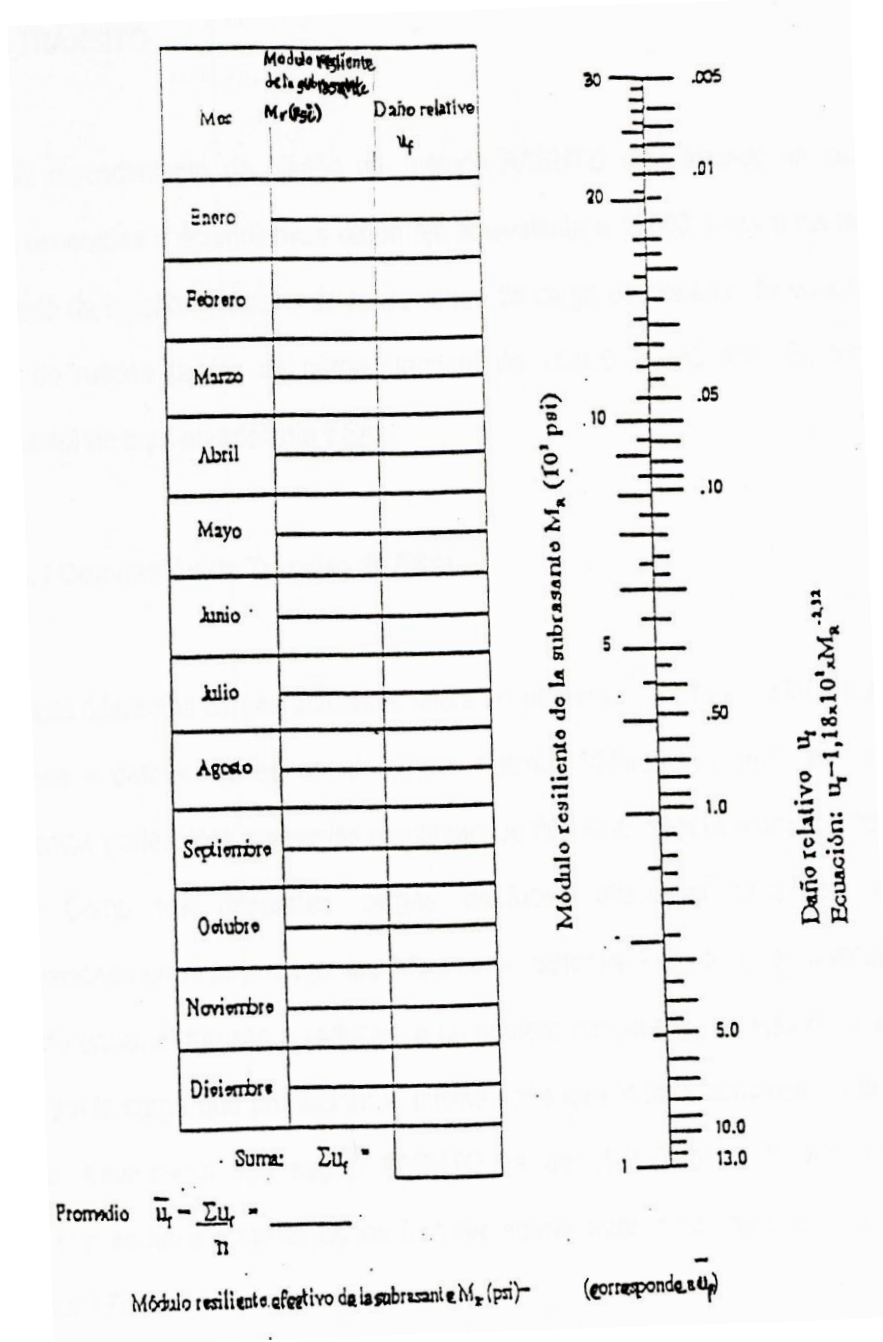


Figura 6.3 Gráfica para estimar el Modulo Resiliente Efectivo

6. Luego se determina un daño relativo medio anual sumando todos los valores de u_f y dividiendo por el número de períodos:

$$u_{f(\text{prom})} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} u_f}{n}$$

7. El módulo de Resiliencia efectivo M_R de la subrasante es el que corresponde al u_f promedio ya determinado y éste valor es el valor a considerar en el diseño del pavimento flexible, usando la ecuación siguiente:

$$M_R = 10^{\log \left(\frac{u_{f\text{prom}}}{1.18^n \times 10^8} \right) \times -2.32}$$

Dado que en nuestro país no se cuenta con el equipo de laboratorio para ejecutar un ensayo de Módulo Resiliente de suelos de subrasante, es conveniente relacionarlo con otras propiedades de los materiales. Por ejemplo, con respecto al CBR se tiene:

$$\text{Shell (Heukelom - KIomp) } M_R (\text{psi}) = 1500 \times \text{CBR}$$

La ecuación anterior es considerada razonable para suelos finos con CBR sumergidos menores del 10%, pero este valor de 1500 puede variar entre 750 y 3600 para M_R en psi. Como referencia, suelos con Módulo de Resiliencia de 3,000 PSI son considerados con pobres características de resistencia mientras que Módulos de 10,000 PSI corresponde a suelos de buenas características.

6.2.3.1.3 Tránsito

El procedimiento de diseño del método AASHTO está basado en las cargas esperadas y acumulativas de un eje equivalente a 18,000 libras durante el período de diseño: "Número de repeticiones de carga equivalente de un eje simple de ruedas duales de carga estándar de 18,000 Lb (80 KN). Se les denominará de aquí en adelante ESA'L.

6.2.3.1.3.1 Conversión de Tránsito de ESAL.

Las diferentes cargas actuantes sobre un pavimento producen diferentes tensiones y deformaciones en el mismo. Además, diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales responden de diferente manera a una misma carga. Como las diferentes cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas serán distintas. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se ve reducido a un número equivalente de ejes de una determinada carga que producirán el mismo daño que toda la composición del tránsito. Esta carga tipo según AASHTO es de 18,000 Lb. ó 80 KN. La conversión se hace a través de los Factores Equivalentes de Carga "LEF" por sus siglas en ingles ("Load Equivalent Factor").

6.2.3.1.3.2 Factor Equivalente de Carga.

El factor equivalente de carga o LEF, es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una carga de un tipo de eje y la producida por el eje estándar de 80 KN en el mismo eje.

$$\text{LEF} = \frac{\text{No de ESAL's de 80 KN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No de ejes x KN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Por ejemplo, para producir una pérdida de serviciabilidad de 4.2 a 2.5 son equivalentes:

100,000 ejes simples de 80 KN

14,347 ejes simples de 133 KN

$$\text{LEF} = \frac{100,000}{14,347} = 6.97$$

6.2.3.1.3.3 Factor de Camión.

El LEF da una manera de expresar los niveles equivalentes de daño entre ejes, pero también es conveniente expresar el daño en términos del deterioro producido por un vehículo en particular; es decir, los daños producidos por cada eje de un vehículo son sumados para dar el daño producido por ese vehículo. Así nace el concepto de factor de camión que es definido como el número de ESAL's por vehículo. Este factor de camión puede ser computado para cada clasificación general de vehículos o para todos los camiones comerciales como un promedio para una dada configuración de tránsito. Es más preciso considerar factores de camión para cada clasificación general de vehículos.

$$\text{Factor de Camion (TF)} = \frac{\text{No de ESALs}}{\text{No de Camiones}}$$

6.2.3.1.3.4 Factor de Distribución por Dirección (DD).

Este factor se expresa como una relación entre las distribuciones de ESAL's en ambos sentidos de circulación. Normalmente es 0.5, es decir, que el total del flujo vehicular

censado, la mitad va por cada dirección, pero en algunos casos puede ser mayor en una dirección que en otra, por lo que debería adoptarse un valor mayor.

6.2.3.1.3.5 Factor de Distribución por Carril (LD).

El carril de diseño es aquel que recibe el mayor número de ESAL's, por lo que este factor se expresa en porcentaje (%). Para un camino de dos carriles, cualesquiera puede ser el carril del diseño, ya que el tránsito por dirección obligadamente circula por ese carril. Para este caso $LD = 1$. Para caminos de varios carriles, para efectos de diseño se toma el carril más externo, dado que los vehículos, y por lo tanto la mayor parte del ESAL's, usan ese carril. Como guía pueden emplearse los siguientes valores, mostrados en la Tabla 6.2:

TABLA 6.2	
<i>NUMERO DE CARRILES</i>	<i>FACTOR DIRECCIONAL LD</i>
1	1.00
2	0.80-1.00
3	0.60-0.80
4	0.5-0.75

Generalmente los datos de tránsito que se recopilan son los ESAL's acumulados en ambos sentidos de tráfico, pero para fines de diseño se requiere el tráfico que afecta en el carril de diseño ESAL. La siguiente ecuación define el ESAL en el carril de diseño:

$$ESAL = DD \times DI \times ESAL's$$

Donde:

ESAL: ESAL en el carril de diseño

ESAL's: ESAL considerando el tráfico en ambos sentidos

DD: Factor de distribución por dirección

DL: Factor de distribución por carril.

6.2.3.1.3.6 Procedimiento de Cálculo Riguroso.

Este método riguroso requiere el uso de factores de camión por cada clase individual de camiones. En este caso puede realizarse usando la planilla de la Tabla 6.3.

- a) Para la columna 1 es el volumen diario para cada vehículo tipo.
- b) La columna 2 tiene el factor de crecimiento para cada tipo de vehículo. Al multiplicar columna 1 y columna 2 nos resulta el tránsito de diseño que se pone en la columna 3. El factor de crecimiento depende de la tasa de crecimiento y el período de análisis y se obtiene de la Tabla 6.4. Cada tipo de vehículo puede tener tasa de crecimiento distinta, dado que no tienen que crecer al mismo tiempo.
- c) La columna 3 es igual al producto de 1 y 2 por 365 días y resulta la cantidad acumulada de vehículos de cada tipo en el período de análisis.
- d) La columna 4 es el factor de ESAL para cada tipo de vehículo. Para el cálculo del TF se deben analizar los distintos pesos de ejes para cada tipo de vehículo.

e) La columna 5 es el producto de 3 y 4. La suma de 5 es el número total de ESAL's a usar para el diseño del pavimento, el cual debe afectarse por el factor de distribución direccional por carril.

TABLA 6.3

PLANILLA PARA CALCULO DE ESAL					
Ubicación:			Período de análisis:---años		
Tipo de vehículos	Volúmen diario	Factores de crecimientos	Tránsito de diseño	Factor de Camión TF	Número de ESALs p/diseño
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Autos Omnibus					
Pick Ups					
Otros veh. 2 ejes y 4 ruedas					
Camiones (2 ejes y 6 ruedas)					
Camiones (3 ó más ejes)					
Total					
Semirremolque (3 ejes)					
Semirremolque (4 ejes)					
Semirremolque (5 ó más ejes)					
Total					
Camión con acople (5 ejes)					
Camión con acople (6 o más ejes)					
Total					
Total Vehículos			ESALs diseño:		

6.2.3.1.3.7 Factores que Afectan el Cálculo del ESAL's.

- Valor inicial de serviciabilidad
- Valor final de serviciabilidad
- Resistencia del pavimento
- Composición del tránsito
- Peso y porcentaje de camiones
- Configuración de ejes
- Presión de neumáticos

TABLA 6.4 FACTORES DE CRECIMIENTO DE TRANSITO

Periodo de análisis (años)	Factor Crec.	Tasa de crecimiento anual (en %) (g)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Factor = $[(1+g)^n - 1]/g$. Donde g = tasa /100 y no debe ser nula. Si la tasa de crecimiento anual es nula, el factor de crecimiento es igual al período de análisis.

6.2.3.1.4 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que el sistema estructural que forma el pavimento cumpla su función prevista dentro de su período de diseño bajo las condiciones (medio ambiente) que tiene lugar en ese lapso.

Ante el crecimiento del tráfico, las dificultades de definir el tráfico y de las expectativas del público, el riesgo de que los pavimentos no se comporten adecuadamente frente a las expectativas deben ser minimizados. La Tabla 6.5 da los niveles de confiabilidad recomendados por AASHTO.

TABLA 6.5		
<i>TIPO DE CAMINO</i>	<i>CONFIABILIDAD RECOMENDADA</i>	
	<i>ZONA URBANA</i>	<i>ZONA RURAL</i>
Rutas interestatales autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Cuando la construcción por etapas es considerada (período de diseño < período de análisis) se deben componer las confiabilidades para cada etapa para tener la confiabilidad en todo el período de diseño. Así se tiene:

$$R_{etapa} = (R_{total})^{1/n}$$

Donde:

n = Es el número de etapas previstas.

El siguiente procedimiento permite diseñar un pavimento para un nivel predeterminado de Confiabilidad. La desviación estándar del comportamiento del pavimento y el tránsito estimado en el período de diseño pueden ser determinados para un caso de diseño en particular si se dispone de suficiente información o en caso contrario se pueden usar los valores de la Tabla 6.6 desarrollando a partir de análisis de varianza y en base a predicciones futuras de tránsito por la Prueba de Camino de la AASHTO.

TABLA 6.6		
<i>CONDICION DE DISEÑO</i>	<i>DESVIO ESTANDAR (S)</i>	
	<i>FLEXIBLE</i>	<i>RIGIDO</i>
Varianza en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0.44	0.34
Varianza en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito.	0.49	0.39

6.2.3.1.5 Efectos ambientales

El ambiente puede afectar el comportamiento del pavimento en varias formas; los cambios de temperatura y humedad pueden afectar la resistencia, durabilidad y capacidad de carga del pavimento y de los suelos de subrasante. Otros impactos ambientales mayores pueden considerarse, en los climas muy fríos, a la expansión y congelamiento de los suelos de subrasante, reduciendo la calidad de manejo y serviciabilidad del pavimento.

Si cualquiera de los dos factores (expansión o congelamiento) afectan en la pérdida significativa de la serviciabilidad y calidad de manejo; estos deben ser considerados $n=1$ en el diseño de las estructuras del pavimento en todo el período de análisis. En la Figura 6.4 se indica la pérdida de serviciabilidad por efectos ambientales que es el resultado de sumar los efectos de expansión y congelamiento. Por medio de esta gráfica es posible estimar la pérdida de serviciabilidad para diferentes intervalos de tiempo.

En El Salvador la pérdida de serviciabilidad por congelamiento es poco probable que ocurra, pero sí por la acción de suelos expansivos.

Las siguientes expresiones permiten desarrollar la curva de pérdida de serviciabilidad por factores ambientales.

• **Para suelos expansivos**

$$\Delta PSI_{sw} = 0.00335 \times V_R \times P_S \times (1 - e^{-\theta t})$$

Donde:

ΔPSI_{sw} : Pérdida de serviciabilidad debido a la expansión de suelos de subrasante.

θ : Tasa constante de expansión, variable entre 0.40 y 0.20. Los valores mayores corresponden a que el suelo de subrasante es expuesto a una gran humedad debido a las precipitaciones, pobres condiciones de drenaje u otras. Valores menores se adoptan cuando el suelo es menos accesible por el agua, dificultad de ingreso y suelos sin grietas.

La Figura 6.5 puede ser usada como guía.

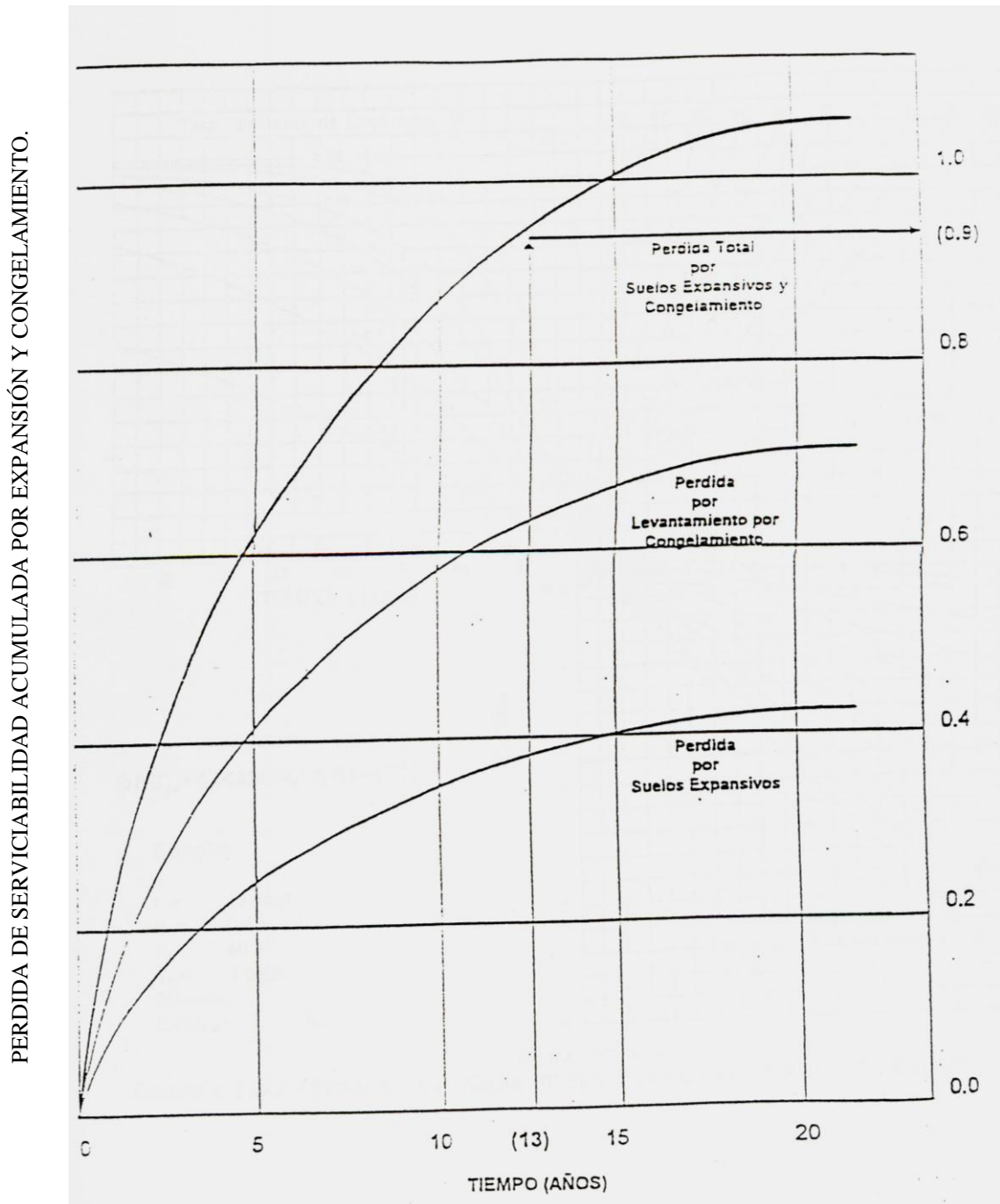
V_R : Potencial de levantamiento vertical (pulg.), representa el levantamiento que puede ocurrir ante condiciones extremas de expansión (alta plasticidad y porosidad). Variable entre 0 y 4 pulgadas. Se obtiene de ensayos en laboratorio (ASTM D424). La Figura 6.6 permite estimar este valor en función de la plasticidad, condición de humedad y espesor de capa de suelo.

P_S : Probabilidad de expansión, % del área total sujeto a expansión. La probabilidad de expansión es considerada en 100% si el Índice de Plasticidad del suelo es mayor del 30% y el espesor de la capa es mayor de 60 cm. o si V_R es mayor de 0.2 pulg.

t : Tiempo en años. Corresponde al período de diseño adoptado.

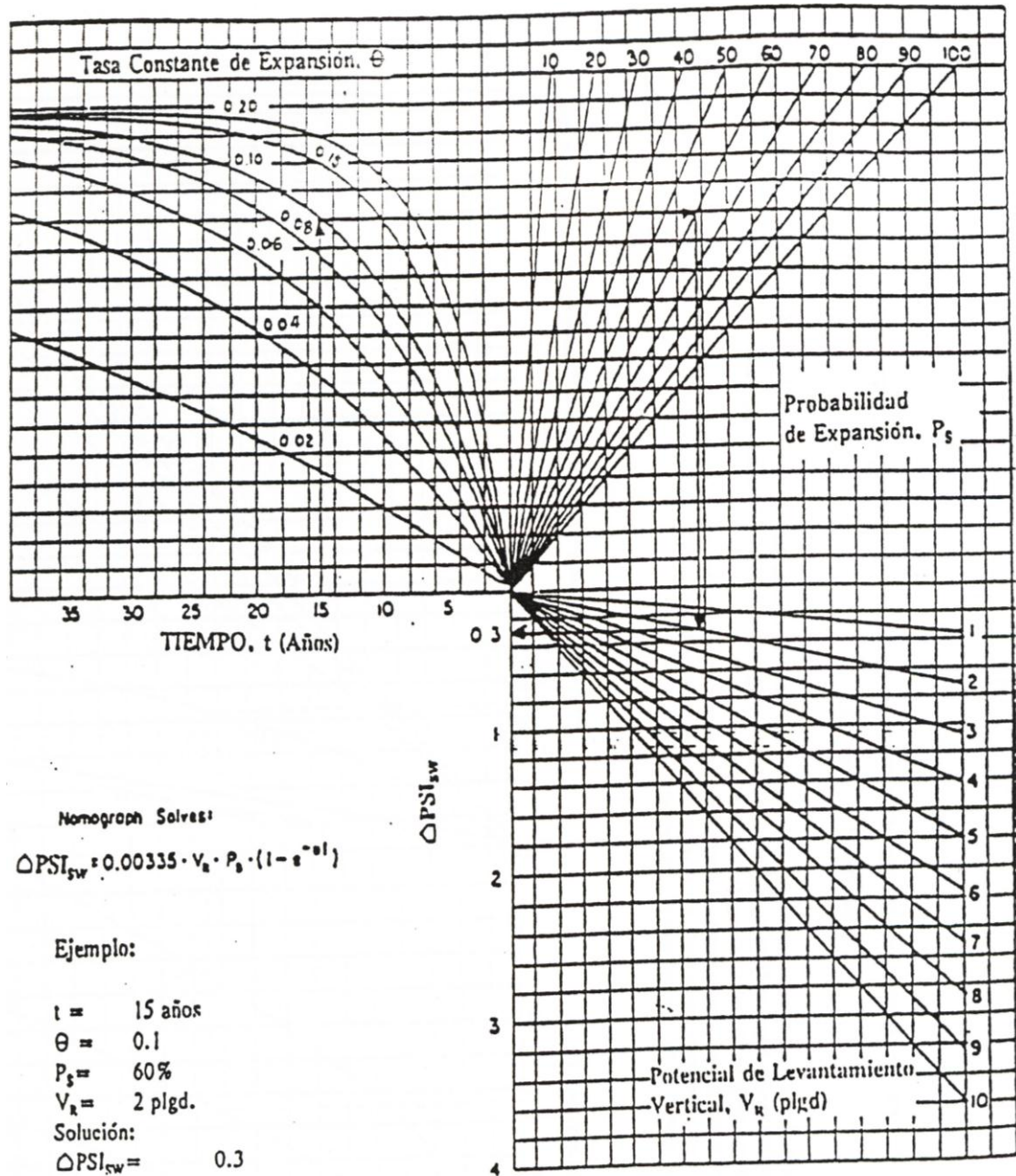
El desarrollo de la ecuación anterior permite definir la curva de la Figura 6.4 que es la manera correcta de proceder. La Figura 6.7 puede ser utilizada para identificar el potencial de expansión.

FIGURA 6.4 EJEMPLO CONCEPTUAL DEL GRAFICO DE PERDIDA DE SERVICIABILIDAD EN EL TIEMPO POR EFECTOS AMBIENTALES (DESARROLLAR PARA CADA LOCALIDAD ESPECIFICA)³²



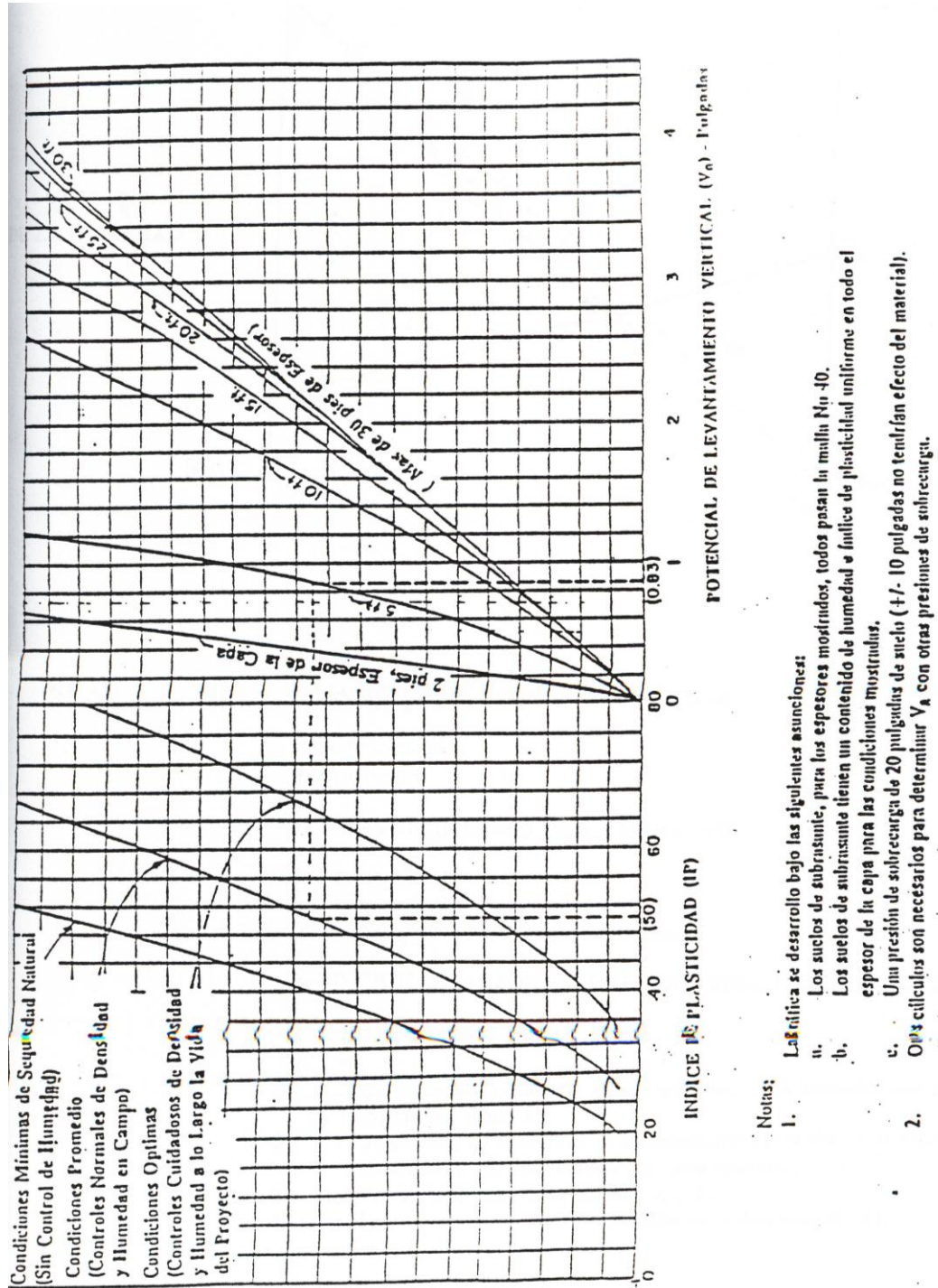
³² Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.5 GRAFICA PARA ESTIMAR LA PERDIDA DE SERVICIABILIDAD PARA SUELOS EXPANSIVOS³³.



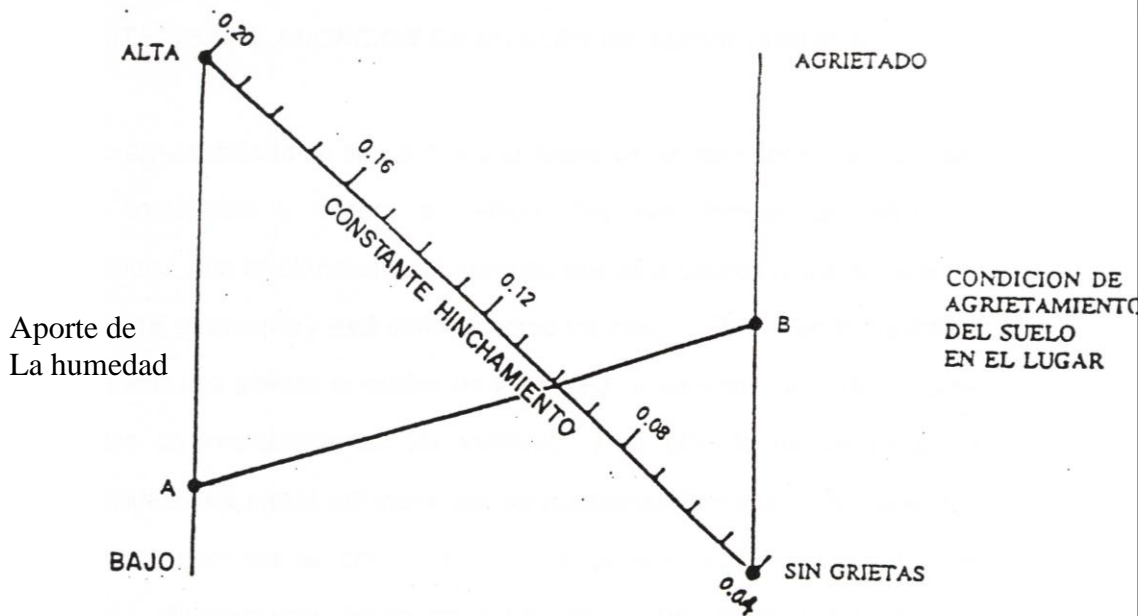
³³ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis: Jaime Ernesto Carvajal, abril 1997.

FIGURA 6.6 GRAFICA PARA ESTIMAR EL POTENCIAL DE LEVANTAMIENTO³⁴



³⁴ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis: Jaime Ernesto Carvajal, abril 1997.

FIGURA 6.7 NOMOGRAMA PARA ESTIMAR LA TASA CONSTANTE DE EXPANSION VERTICAL DE SUELOS NATURALES³⁵.



- Notas:
- a) **BAJA ACCESIBILIDAD DE LA HUMEDAD**
Baja Precipitación
Buen Drenaje
 - b) **ALTA ACCESIBILIDAD DE LA HUMEDAD**
Alta Precipitación
Pobre Drenaje
Cercanía de Obras de Drenaje Transversal
 - c) **CONDICION DE AGRIETAMIENTO DEL SUELO EN EL LUGAR**
 - d) **USO DEL NOMOGRAMA**
 - 1) Seleccione la condición de accesibilidad de la humedad que puede estar entre alta y baja (tal como A).
 - 2) Seleccione la condición de agrietamiento del suelo en el lugar (tal como B). Esta escala debe ser desarrollada por cada agencia.
 - 3) Trazar una línea recta uniendo A y B.
 - 4) Lea la tasa constante de expansión en la diagonal (0.10).

³⁵ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis: Jaime Ernesto Carvajal, abril 1997.

6.2.3.2 Criterios de adopción de niveles de serviciabilidad.

La serviciabilidad se define como la habilidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro al tráfico, hay dos formas de definir la serviciabilidad, una es el Índice de Rugosidad que está basada únicamente en la rugosidad del pavimento y está definida como las irregularidades en la superficie del pavimento que afectan la calidad de la marcha, la seguridad e incremento de los costos de mantenimiento del vehículo; y la otra forma de medir la serviciabilidad es a través del Índice de Serviciabilidad Presente (PSI), que esta basada en la rugosidad así como la medida de los deterioros en la superficie del pavimento: ahuellamiento, fisuración y baches. El PSI oscila entre un valor mínimo de 0 (condición impasable) y un valor máximo de 5 (condición excelente). En la Tabla 6.7 están indicados los niveles de serviciabilidad.

TABLA 6.7	
<i>CONDICION</i>	<i>PSI</i>
Muy pobre	0-1
Pobre	1-2
Regular	2-3
Buena	3-4
Muy buena	4-5

En el diseño de pavimentos deberán ser establecidos los índices de serviciabilidad inicial y final para calcular la variación total en la serviciabilidad (PSI) que será empleado en las ecuaciones de diseño.

El índice de serviciabilidad inicial (P_o) es función de la estructura de pavimento diseñado y la calidad de la construcción del mismo. Los valores recomendados son:

Po : 4.5 para pavimento rígido.

Po : 4.2 para pavimentos flexibles.

El índice de serviciabilidad final (Pt) es el valor más bajo que se admite antes de efectuar una rehabilitación del pavimento, en función de la categoría del camino o clasificación funcional del pavimento. Los valores recomendados son:

Pt: 2.5 ó más para vías de gran importancia.

Pt: 2.0 para caminos de menor importancia.

Un criterio para definir un valor mínimo de serviciabilidad final (Pt) puede ser establecido sobre la base de la aceptación del usuario (PSR).

El dato requerido en el procedimiento de diseño de espesores de pavimentos flexibles de AASHTO es el cambio en el PSI = Po - Pt que puede ser aplicada a pavimentos flexibles y rígidos.

Debido a que muchas agencias trabajan con valores de rugosidad aparece el Índice de Rugosidad Internacional, IRI, que es una medida estándar de la rugosidad a la cual pueden compararse otras medidas de rugosidad. Además se relaciona el IRI con el PSR a través de la ecuación:

$$PSR = 5 \times e^{(-0.0041 IRI)}$$

Donde:

IRI : Índice de Rugosidad Internacional, en pulg/milla.

6.2.3.3 Propiedades de los materiales.

Como ya se ha hablado, la variable para la caracterización de los materiales en el método AASHTO es el Módulo Resiliente (M_R), y en función de los mismos se obtienen los coeficientes estructurales o de capa.

6.2.3.3.1 Caracterización de los materiales de las capas del pavimento.

El método AASHTO se apoya en la determinación de las propiedades de los materiales para la estimación de los valores apropiados del coeficiente de capa. Los ensayos de preferencia son los del Módulo de Resiliencia (método AASHTO T 724) para materiales granulares no ligados y el Módulo Elástico (ASTM D 4123), para materiales de concretos asfálticos y otros materiales estabilizados.

El coeficiente de capa (a_i) es una medida de la habilidad relativa de una unidad de espesor de un material dado para funcionar como componente estructural del pavimento, se expresa en 1/unidad de longitud.

Estos coeficientes de capa pueden ser determinados en base a ensayos de carreteras o de relaciones basadas en las propiedades de los materiales como son el Módulo de Resiliencia. A continuación se detallan coeficientes de capa para algunos materiales.

- a) **Concreto Asfáltico.** En las figuras 6.8 a y b representan un ábaco, válido para estimar el coeficiente de capa de los concretos asfálticos, donde estos coeficientes (a_i) están en función de la estabilidad Marshall (L_b), del cohesiómetro de Hveem y del Módulo Resiliente respectivamente.

Se recomienda tener cuidado con la selección de los coeficientes de capas de concretos asfálticos con valores de Módulo de Resiliencia mayores de 450,000 psi, puesto que su incremento en la rigidez va acompañado del incremento térmico o por fatiga.

Valores de a_i entre 0.38 y 0.44 (1/pulg) son recomendados. Las pruebas AASHTO adoptan el valor de 0.44.

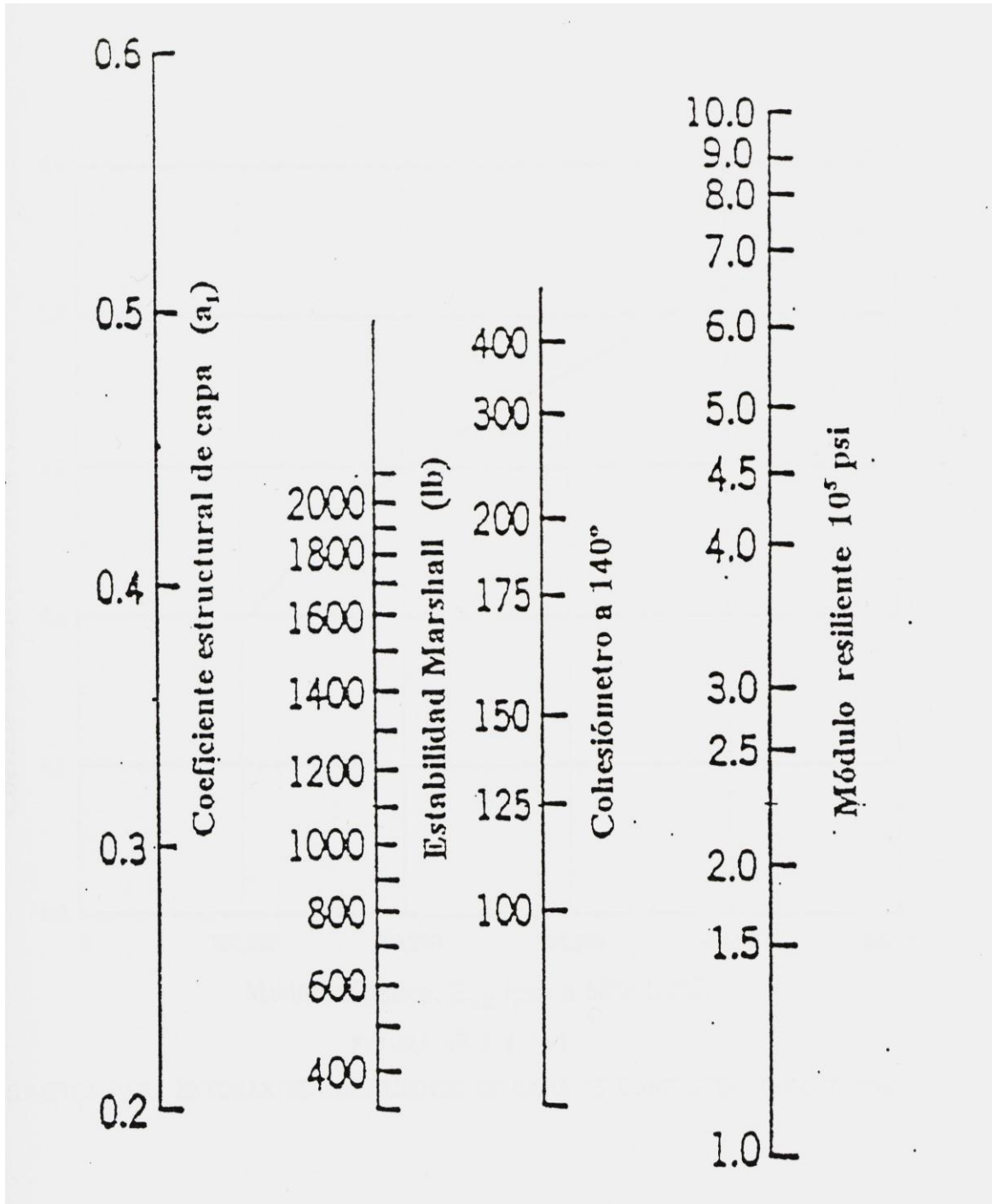
En las Figuras No 6.9, 6.10, 6.11 y 6.12 se muestran ábacos para determinar los coeficientes estructurales de capa para materiales de: bases granulares, sub-base granulares, bases tratadas con cemento y bases tratadas con asfalto.

La Tabla 6.8 mostrada a continuación presenta sumariamente los valores de coeficientes estructurales de capa normalmente empleados.

TABLA 6.8³⁶	
<i>COEFICIENTES DE CAPA (ai 1/ pulg.)</i>	
<i>MATERIAL</i>	<i>VALORES</i>
Concreto asfáltico	0.30-0.44
Base estabilizada con asfalto	0.20-0.38
Base tratada con cemento	0.15-0.20
Base tratada con cal	0.15-0.20
Base de piedra triturada	0.13-0.14
Subbase granular	0.09-0.12

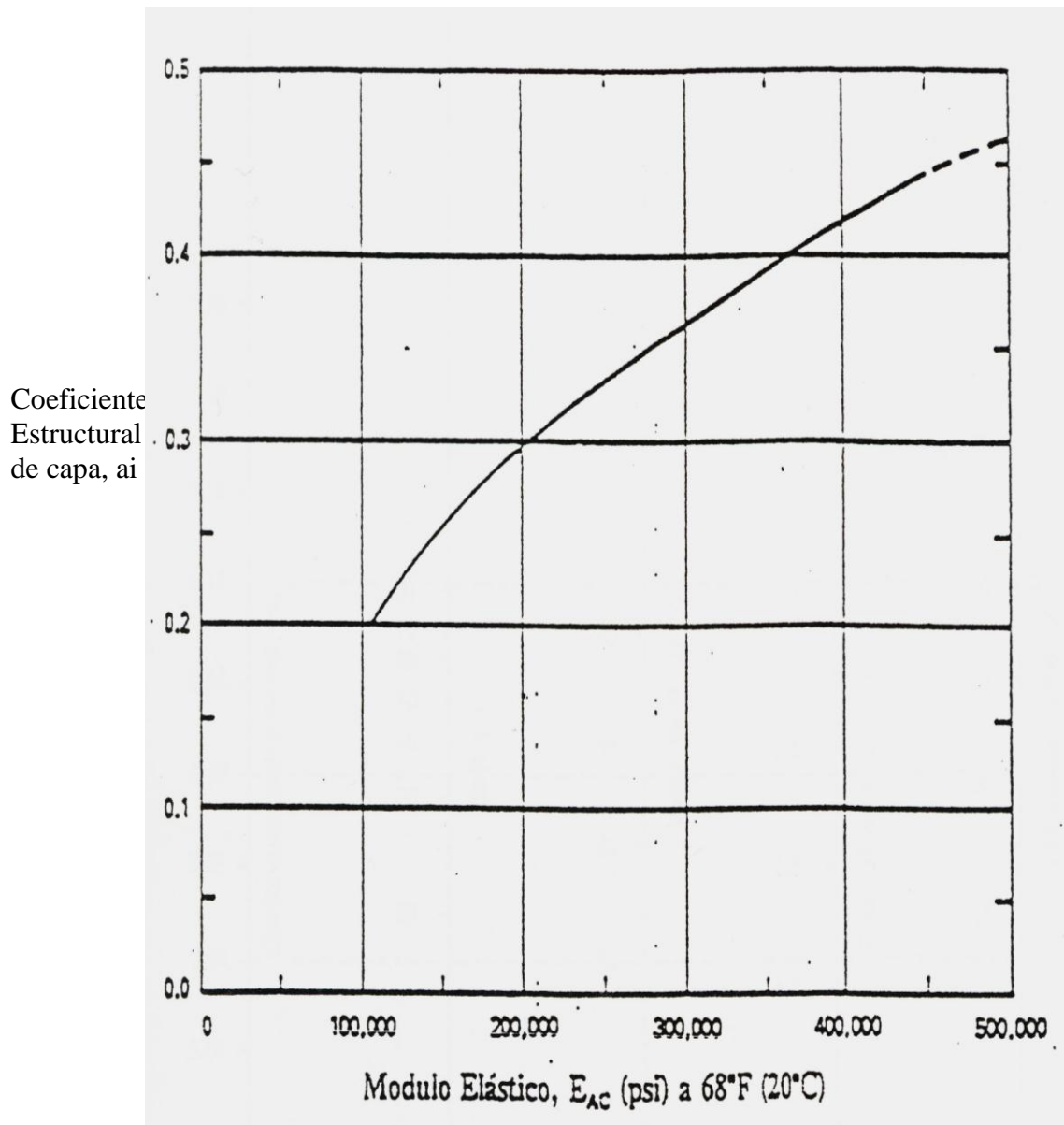
³⁶ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis: Jaime Ernesto Carvajal, abril 1997.

FIGURA 6.8 (a) COEFICIENTES ESTRUCTURALES PARA CAPAS ASFÁLTICAS³⁷



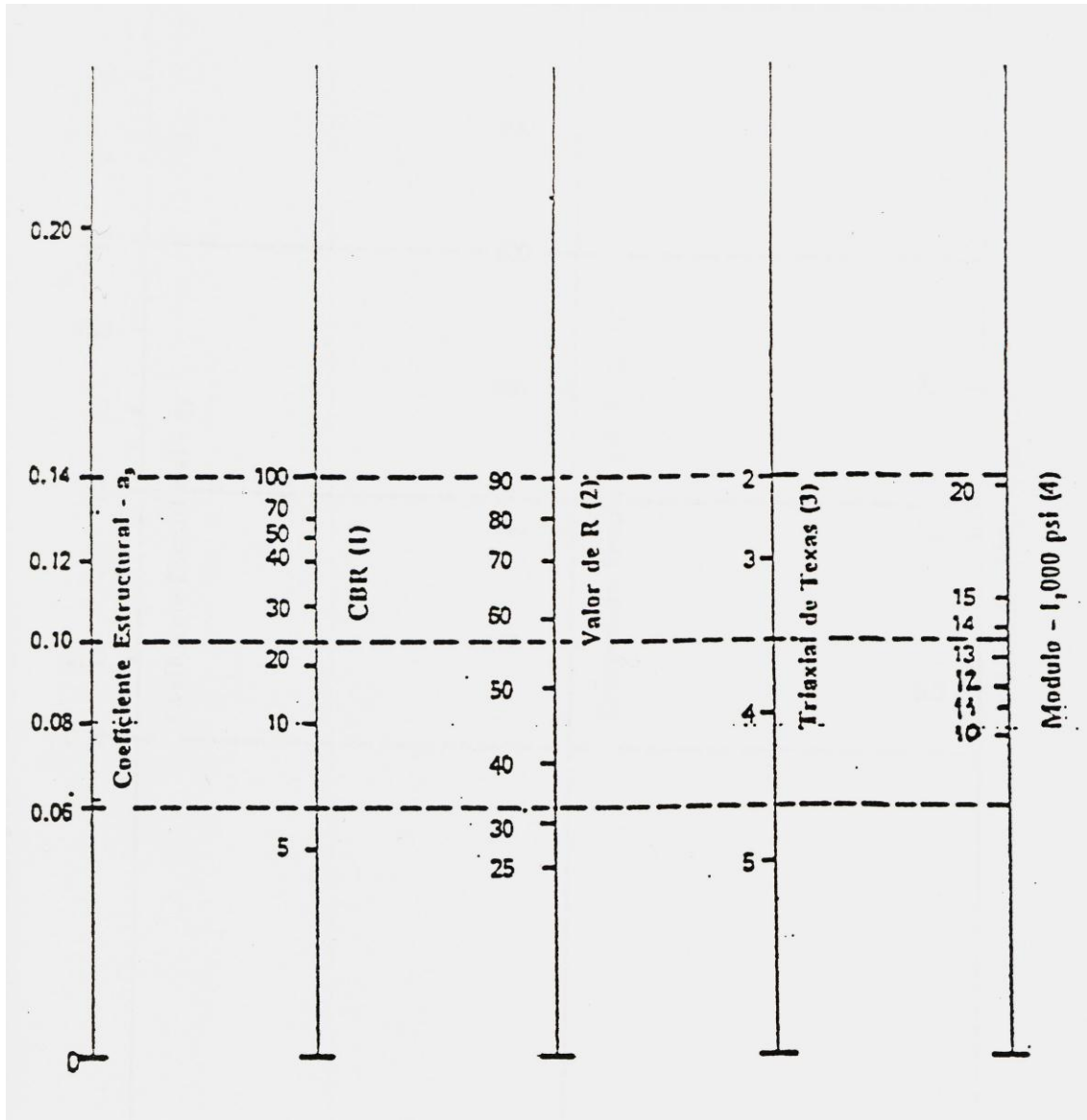
³⁷ Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.8 (b) GRAFICA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CAPA DE CONCRETOS ASFALTICOS³⁸.



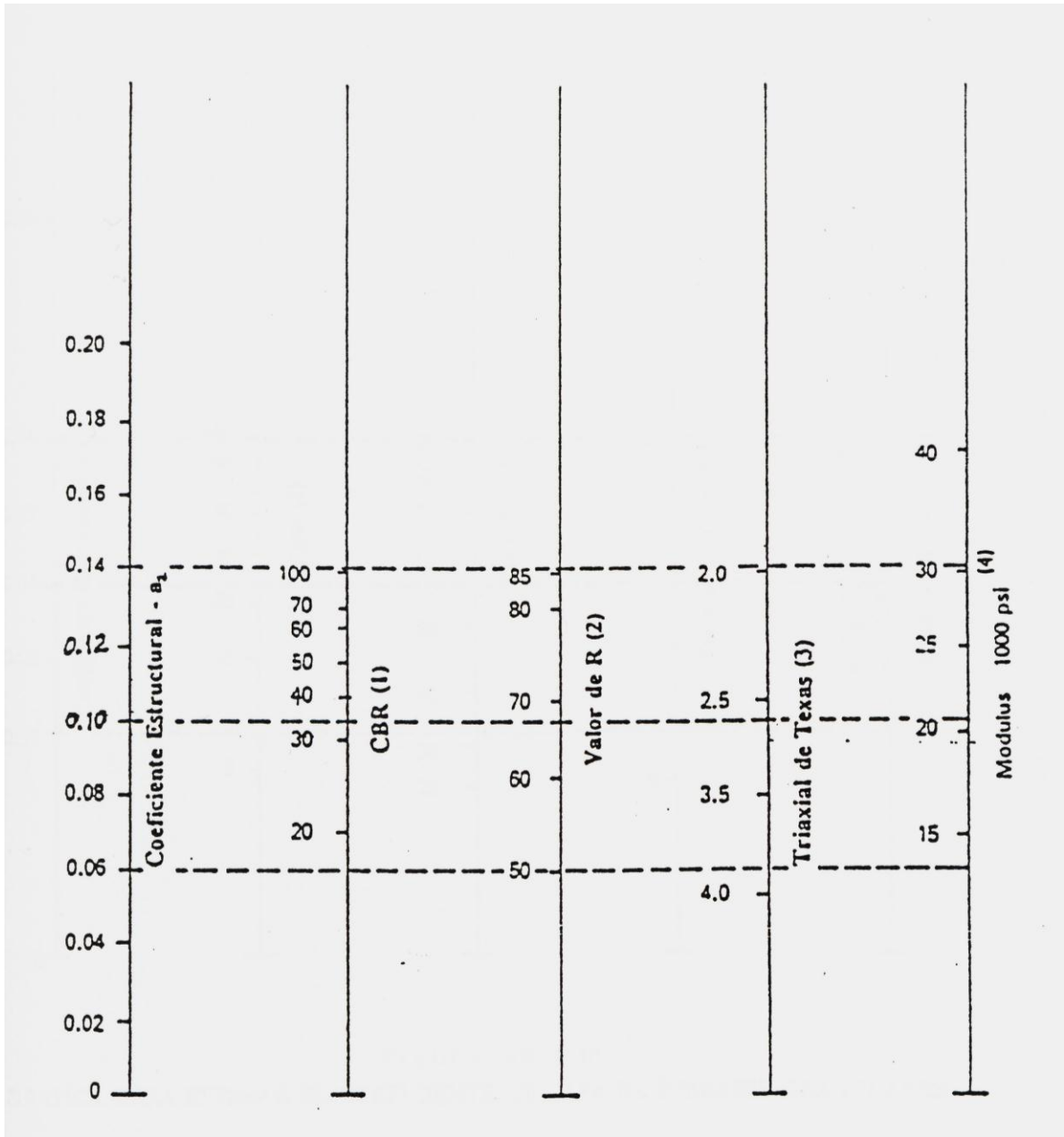
³⁸ Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.9 GRAFICA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CAPA DE BASES GRANULARES³⁹



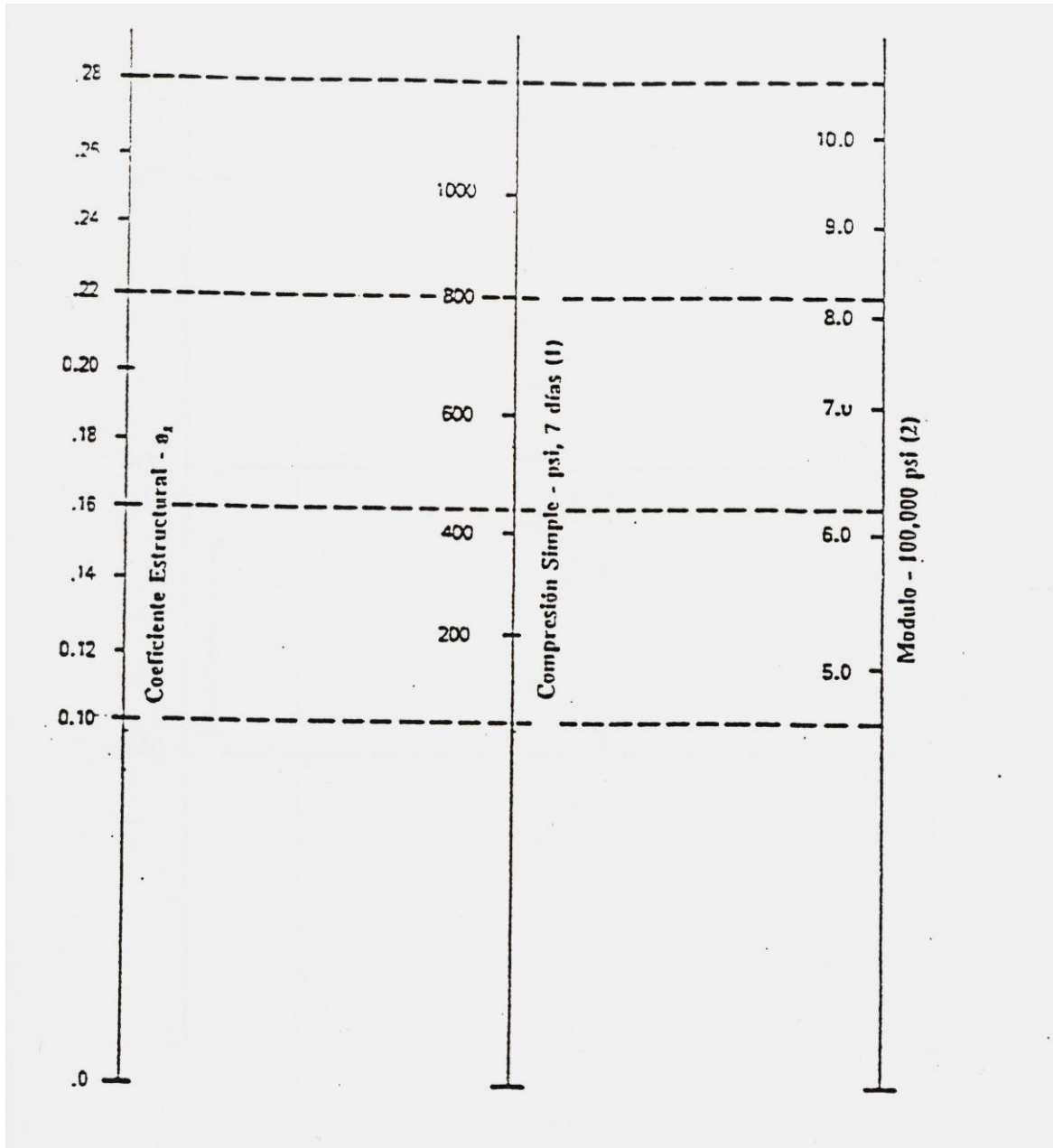
³⁹ Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.10 GRAFICA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CAPA DE SUBBASES GRANULARES⁴⁰



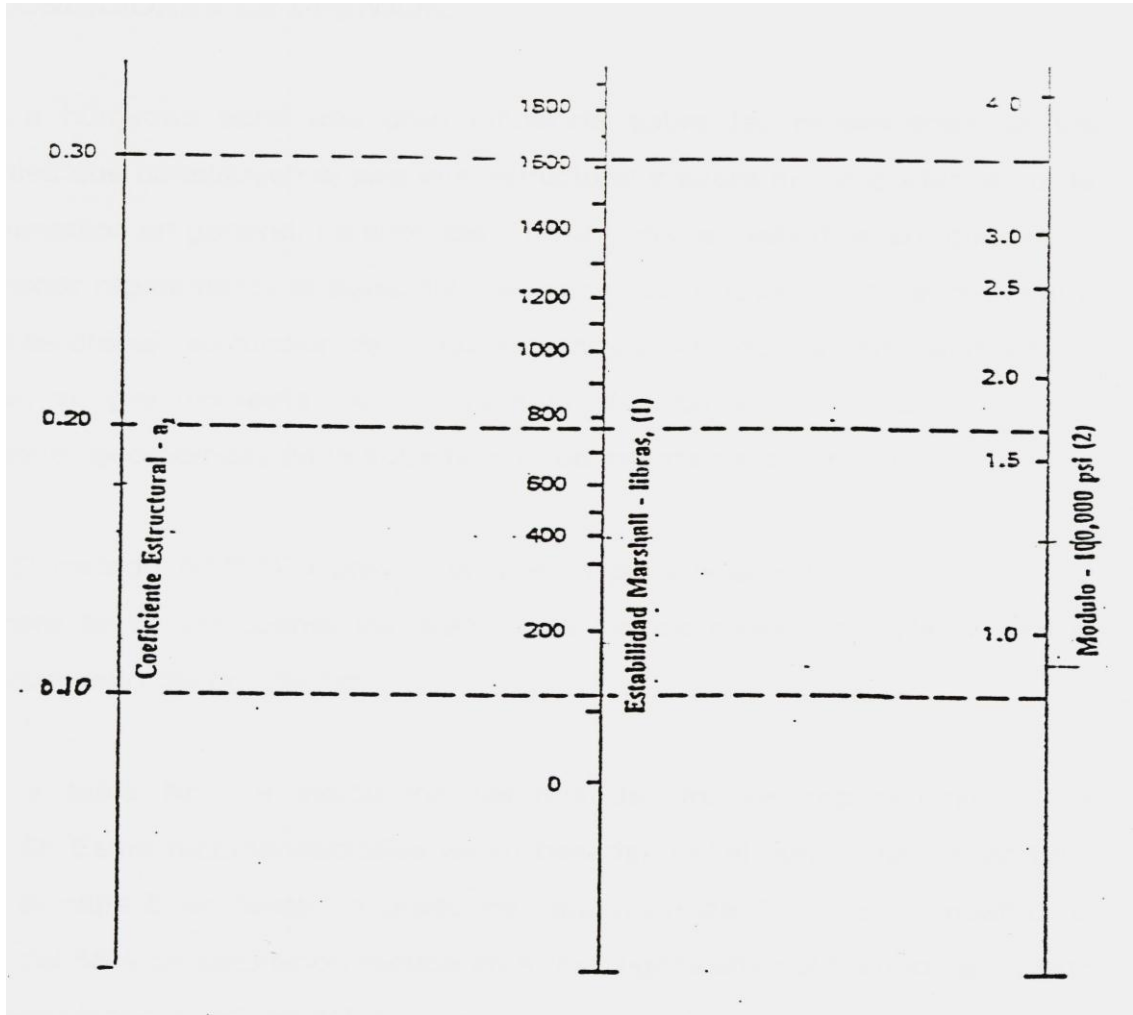
⁴⁰ Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.11 GRAFICA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CAPA DE BASES TRATADAS CON CEMENTO⁴¹



⁴¹ Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

FIGURA 6.12 GRAFICA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE CAPA DE BASES TRATADAS CON ASFALTO⁴².



6.2.3.4 Condiciones de drenaje.

La humedad tiene una gran influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen el paquete estructural y sobre el comportamiento de los pavimentos en

⁴² Procedimiento de Diseño para Nuevos Pavimentos AASHTO, febrero 1994 Publicación FHWA-HI-94-023

general. La subbase y base granular deben de ser diseñadas para drenar rápidamente el agua del pavimento. La drenabilidad del material o calidad de drenaje es función de varios aspectos incluyendo la permeabilidad del material, su granulometría, % del material tipo (pasa malla No 200) y las condiciones geométricas de la superficie y subrasante del pavimento.

El método AASHTO prevé los medios para ajustar los coeficientes de capa para tomar en cuenta los efectos de ciertos niveles de drenaje en el comportamiento del pavimento.

La Tabla 6.9 indica los tiempos de drenaje recomendados por AASHTO. Estas recomendaciones están basadas en el tiempo requerido para drenar la capa base hasta un grado de saturación del 50%. Sin embargo, el criterio del 85% de saturación reduce en forma significativa el tiempo real usado para seleccionar la calidad del drenaje.

TABLA 6.9		
<i>Calidad de drenaje</i>	<i>50% saturación</i>	<i>85% saturación en</i>
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	Mas de 10 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mucho mas de 10 horas

El efecto del drenaje de las capas no tratadas (base granular y subbase granular) que yacen por debajo de las capas asfálticas está considerado por la multiplicación de los coeficientes de capa (a_i) y los coeficientes de drenaje m_i que afectan a las capas no ligadas.

La Tabla 6.10 muestra coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles recomendados por AASHTO.

TABLA 6.10				
COEFICIENTES DE DRENAJE m_i				
Calidad de drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.			
	< 1%	1-5%	2-25%	>25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Las condiciones de drenaje utilizadas en el ensayo de carreteras AASHTO, se consideraron como regulares y los valores m_i de los mismos, se asumieron como 1.0 sin importar el material. Estos materiales probablemente recibirán factores de modificación del drenaje por debajo de 1.0 en el caso de una construcción nueva, por lo que el diseñador deberá seleccionar valores apropiados para reducir la posibilidad de un infradiseño.

6.2.3.5 Cálculo de los espesores de las capas del pavimento.

El procedimiento AASHTO de diseño de pavimentos puede ser efectuado empleando las variables y ecuaciones discutidas mas adelante. Estas ecuaciones pueden resolverse manualmente y/o usando nomogramas.

El procedimiento manual es muy exacto, si bien los nomogramas simplifican el proceso, éstos hacen de sus soluciones, en alguna manera, menos precisas que las soluciones manuales o computarizadas.

El primer paso para el diseño por el método AASHTO es la determinación del número estructural (SN) para el nivel tráfico en cuestión. Posteriormente se definen varias alternativas de prueba que provean el número estructural adecuado, satisfacen requerimientos de espesores mínimos, y protegen adecuadamente las capas inferiores.

Luego se ajusta el período de diseño correspondiente para tener en cuenta la pérdida de serviciabilidad debido a condiciones ambientales. De requerirse la opción de construcción por etapas es considerada para admitir rehabilitaciones dentro del período de análisis por razones económicas y/o ambientales.

6.2.3.5.1 Determinación del número estructural requerido.

La Figura 6.13 presenta el nomograma recomendado para la determinación del número estructural de diseño requerido para condiciones específicas.

Dicho nomograma resuelve la siguiente ecuación:

$$\log W_{18} = Z_R * S_0 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.2 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log M_R - 8.07$$

Los datos requeridos en esta ecuación son:

- El tráfico estimado durante el período de diseño $W_{18} = \text{ESAL}$

- Valor de confiabilidad R se asume que los datos ingresados corresponden a valores promedio (tabla 6.11). Para el cálculo manual, emplear los siguientes valores de Z_R que se obtienen de la aplicación de la confiabilidad del diseño.
- La desviación estándar promedio S_o
- El Módulo efectivo de Resiliencia de la subrasante, MR
- La pérdida de nivel de servicio de diseño $PSI = P_o - P_t$

6.2.3.5.2 Prueba de alternativas de espesores de capas del pavimento.

Una vez determinado SN se debe de identificar varias combinaciones de espesores que corresponden al número estructural requerido, utilizando la siguiente ecuación:

$$SN = \sum_{i=1}^{i=n} (a_i D_i m_i) = a_1 \times D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

Donde: a_i : Coeficiente de la capa i (1/pulg)

D_i : Espesor de la capa i pulg.

m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i.

Esta ecuación no tiene una solución única. Existen muchas combinaciones de capas de pavimentos que pueden adoptarse para alcanzar el número estructurado (SN). Consideraciones de diseño, construcción y de costos permiten reducir el número de combinaciones posibles de capas así como evitar la posibilidad de diseño imprácticos.

TABLA 6.11	
CONFIABILIDAD R(%)	Z_R
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
92	-1.405
93	-1.476
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.831
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

6.2.3.5.3 Concepto de análisis de capas.

Las estructuras de pavimentos son sistemas de capas que deben diseñarse adecuadamente. Las capas de base y sub-base granular deben de ser protegidas de esfuerzos verticales excesivos que pueden originar deformaciones permanentes, esto implica que la necesidad por espesores mínimos de cada capa es la estructura del pavimento para los requerimientos de tráfico. Estas ecuaciones para el análisis de capa se muestran en la Figura 6.14.

El nomograma de la Figura 6.13 permite determinar los números estructurales requeridos para proteger cada capa de base o sub-base granular (SN_i), utilizando en cada caso el Módulo de Resiliencia de estos materiales en vez de la subrasante; lo más aconsejable es hacerlo por la fórmula descrita en la Figura 6.14 entonces el espesor mínimo de concreto D_1^* se determina dividiendo el número estructural requerido para proteger la base granular (SN_1) por el coeficiente de capa del concreto asfáltico (SN_1/a_1).

El espesor seleccionado de concreto asfáltico debe ser mayor o igual que este mínimo (D_1).

El espesor mínimo de base se selecciona en forma análoga buscando proteger la subbase. El número estructural que provee el espesor seleccionado del concreto asfáltico ($SN_1^* = a_1D_1$) se resta del valor necesario para proteger la subbase (SN_2). Este valor se divide por el coeficiente estructural de la base.

(Teniendo en cuenta el efecto del drenaje), para obtener el espesor (D_2^*). El espesor seleccionado de la base debe ser mayor o igual que dicho valor (D_2).

Finalmente, el espesor mínimo de subbase granular (D_2^*) se calcula restando el número estructural requerido para proteger la subrasante (SN_3), el valor correspondía a la base más el concreto asfáltico. El resultado de ésta diferencia dividido por el coeficiente estructural de la subbase (incluido el efecto del drenaje) es el espesor mínimo de esta capa (D_3).

El número estructural finalmente, considerando los espesores de las capas seleccionadas, debe ser mayor que aquel obtenido del nomograma para proteger la subrasante (SN₃). Se hace notar que los espesores deberían ser definidos con aproximación a 0.5 pulg (Figura 6.14).

Este procedimiento no es aplicable cuando se trata de determinar espesores de capa sobre materiales con Módulos de Resiliencia por encima de 40,000 psi. En estos casos la selección de espesores se debe hacer basada en consideraciones de efectividad de costos mínimos prácticos constructivos.

El nomograma resuelve:

$$\text{Log}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log(\text{SN} + 1) - 0.20 + \frac{\frac{\log(PSI)}{(4.2 - 1.5)}}{0.4 + \frac{10.94}{(\text{SN} + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log M_R^{-8.07}$$

FIGURA 6.13 NOMOGRAMA DE DISEÑO AASHTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.

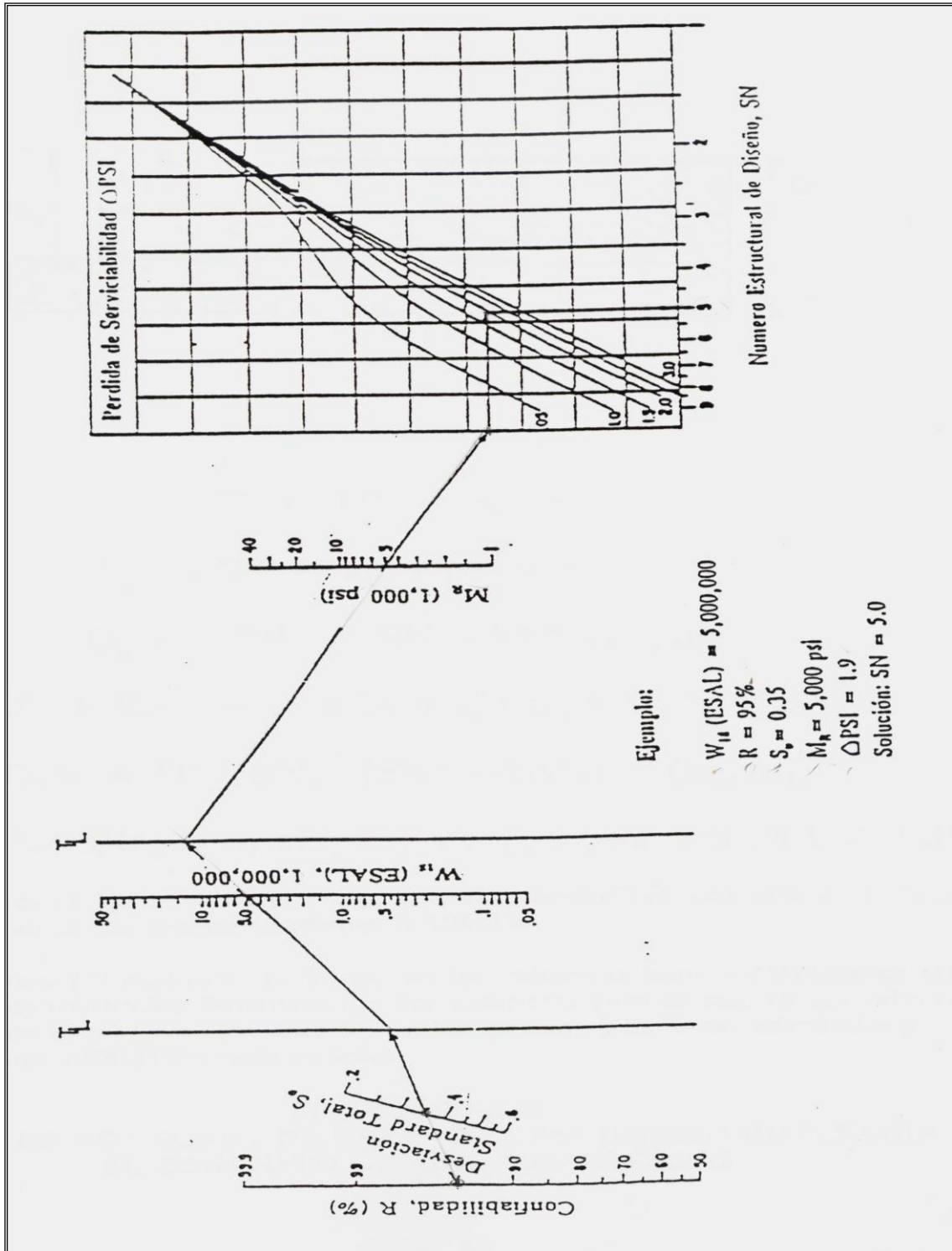
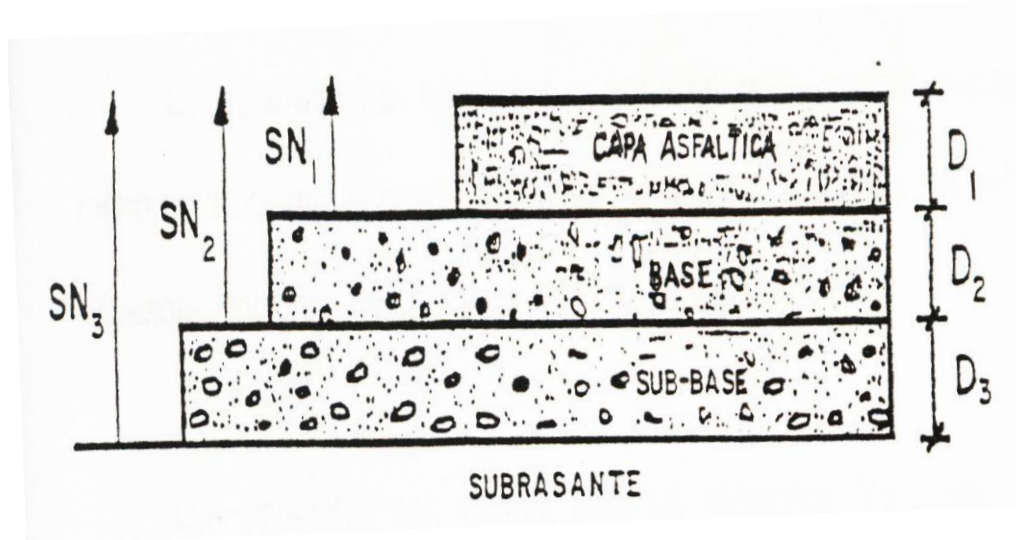


FIGURA 6.14



$$D_1 \geq D_1^* = SN_1/a_1$$

$$SN_1^* = a_1 \times D_1 \geq SN$$

$$D_2 \geq D_2^* = (SN_2 - SN_1^*) / a_2 \times m_2$$

$$SN_1^* + SN_2^* = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 \geq SN_2$$

$$D_3 \geq D_3^* \{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)\} / (a_3 \times m_3)$$

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \geq SN_3$$

1. Los valores de SN se obtienen de la ecuación AASHTO. Los valores de “a y m” se seleccionan de las recomendaciones AASHTO.
2. El asterisco (*) mostrado en D indican los valores mínimos obtenidos de las ecuaciones mostradas. Mientras que los asteriscos para el caso de los valores de SN indican número estructural para los espesores de capas adoptados y coeficientes AASHTO seleccionados.

6.2.3.6 Estabilidad y facilidad de construcción.

Es generalmente impráctico y antieconómico colocar capas que sean menores de ciertos espesores mínimos, también la magnitud del tráfico requiere espesores mínimos de capas por estabilidad y adhesión.

Los siguientes son valores mínimos sugeridos en la Tabla 6.12, los cuales se deberán modificar de acuerdo con las condiciones locales.

TABLA 6.12⁴³		
<i>TRAFICO (ESAL)</i>	<i>ESPESOR MÍNIMO (PULGADAS)</i>	
	<i>CONCRETO ASFALTICO</i>	<i>BASE GRANULAR</i>
MENOS DE 50,000	1.0	4
50,000 A 150,000	2.0	4
150,000 A 500,000	2.5	4
500,000 A 2.000,000	3.0	6
2,000,001 A 7,000,000	3.5	6
MAS DE 7.000,000	4.0	6

El efecto de tratamientos superficiales es generalmente despreciable; sin embargo, estas mejoran substancialmente las condiciones de base y subbase. Su efecto se debe evaluar con base a las condiciones particulares del proyecto.

⁴³ Ibidem

6.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS UTILIZADO POR EL INSTITUTO AMERICANO DEL ASFALTO (MS-1)⁴⁴

6.3.1 Introducción

A continuación se presentan los aspectos más importantes a tomar en cuenta y la teoría para el uso de tablas y gráficas para el proceso de diseño.

6.3.1.1 Alcance

El manual del Instituto Americano del Asfalto presenta una metodología para el diseño estructural de los espesores de capas del pavimento utilizando cemento asfáltico en toda o parte de la estructura. Se incluyen varias combinaciones de concreto asfáltico de superficie, base de concreto asfáltico y bases o subbases granulares. El Manual presenta guías para la definición de las propiedades de los suelos de subrasante, propiedades de los materiales que conforman las capas de pavimentos y parámetros de tráfico requeridos para la selección de los espesores apropiados de las capas del pavimento. En el manual también se incluyen recomendaciones para los requerimientos de compactación.

6.3.1.2 Base del diseño

El pavimento flexible es considerado como un sistema elástico multicapas. Para desarrollar esta metodología de diseño, se ha recurrido a la teoría establecida, a la experiencia, a datos de ensayos y a un programa de computadora analítico (DAMA).

⁴⁴ Extraído de la tesis Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO 93 y el Instituto Americano del Asfalto 91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Autor: Jaime Ernesto Carvajal.

La metodología del diseño ha sido simplificada a cartas de diseño para eliminar la necesidad de la computadora o de complicados ensayos de laboratorio.

El programa de análisis elástico de multicapas, DAMA, y un programa de computadora para el diseño de espesores (HWY) pueden ser obtenidos en el Instituto del Asfalto.

La metodología considera 2 condiciones de Esfuerzo-Deformación (Stress-Strain) Unitaria específicas según se ilustra en las Figuras 6.15 y 6.16.

En la primera condición (Figura 6.15 a) la carga W es transmitida a la superficie del pavimento a través de la llanta como una presión vertical uniforme, P_o . La estructura del pavimento distribuye los esfuerzos verticales reduciendo la magnitud de la presión vertical hasta un valor máximo P_1 en la superficie de la subrasante.

La Figura 6.15 b ilustra de manera general como la máxima presión vertical disminuye con la profundidad de P_o a P_1 .

La segunda condición se ilustra en la Figura 6.16 donde la carga de llanta W deflecta el pavimento causando esfuerzos y deformaciones unitarias tanto de tensión como de compresión en la capa asfáltica.

Las curvas de diseño presentadas en este manual han sido desarrolladas utilizando criterios de deformación unitaria máxima de tensión en el fondo de la capa asfáltica y criterios de deformación unitaria de compresión vertical en la superficie de la subrasante impuestas por las cargas del tráfico.

6.3.1.3 Bases asfálticas.

El documento incluye cartas de diseño para capas de base de concreto asfáltico y bases granulares.

Las bases asfálticas ofrecen muchas ventajas comparadas con las bases granulares.

Una de las mayores ventajas es que la base asfáltica resiste los esfuerzos mucho mejor que la base granular, la cual no posee resistencia a la tensión. Consecuentemente, para las mismas condiciones de cargas las bases asfálticas pueden ser construidas con un espesor menor que las bases granulares.

Otras ventajas importantes de la base asfáltica son:

- Bajo una adecuada construcción, las bases asfálticas producen pavimentos de mejor calidad de circulación.
- Agregados desechados para la capa asfáltica de superficie pueden frecuentemente ser usados en bases asfálticas.
- Las bases asfálticas son excelentes para el desarrollo de la construcción en etapas.
- Se reducen las demoras en la construcción ocasionadas por el mal tiempo.
- La base asfáltica puede ser usada por el tráfico de la construcción antes de colocar la capa de superficie, agilizando de esta manera la construcción.

6.3.1.4 Pavimento todo-concreto asfáltico.

Un pavimento todo-concreto asfáltico (full-depth asphalt pavement) es un pavimento en el que se utilizan mezclas asfálticas para todas las capas encima de la subrasante natural o mejorada. Además de las ventajas citadas en 6.3.1.3, el pavimento todo-concreto

asfáltico no "atrapa" agua que puede causar fallas en la base o en subrasante como sucede frecuentemente en el caso de bases granulares. De hecho, no hay o existe una pequeña reducción en la capacidad soporte de los suelos de subrasante bajo pavimentos todo-concreto asfáltico.

De acuerdo a estudios limitados se ha encontrado que, luego de la construcción, el contenido de humedad de una subrasante arcillosas se estabiliza a un contenido de humedad menor en los pavimentos todo-concreto asfáltico, fenómeno generalmente opuesto al que se encuentra cuando se emplean bases granulares. Sin embargo, el uso de pavimentos todo-concreto asfáltico no elimina la necesidad de considerar el subdrenaje adecuado. El diseño de un adecuado sistema de drenaje es un aspecto esencial a considerar dentro del diseño de pavimentos. Incluso cuando no se consideran sistemas de subdrenaje, drenes interceptores frecuentemente son requeridos para desviar las aguas freáticas. Otras ventajas del pavimento todo-concreto asfáltico son:

- Se reduce el tiempo de construcción.
- Cuando se construye en capas gruesas, 100 mm o más. Se puede extender la temporada de construcción.
- Existe una menor interferencia con los sistemas de servicios públicos durante la construcción de calles en ciudades, principalmente debido a que el espesor del pavimento todo-concreto asfáltico es menor que aquellos con capas de base y/o subbase granular.

FIGURA 6.15 DISTRIBUCIÓN DE LA PRESION DE CARGA A TRAVÉS DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.

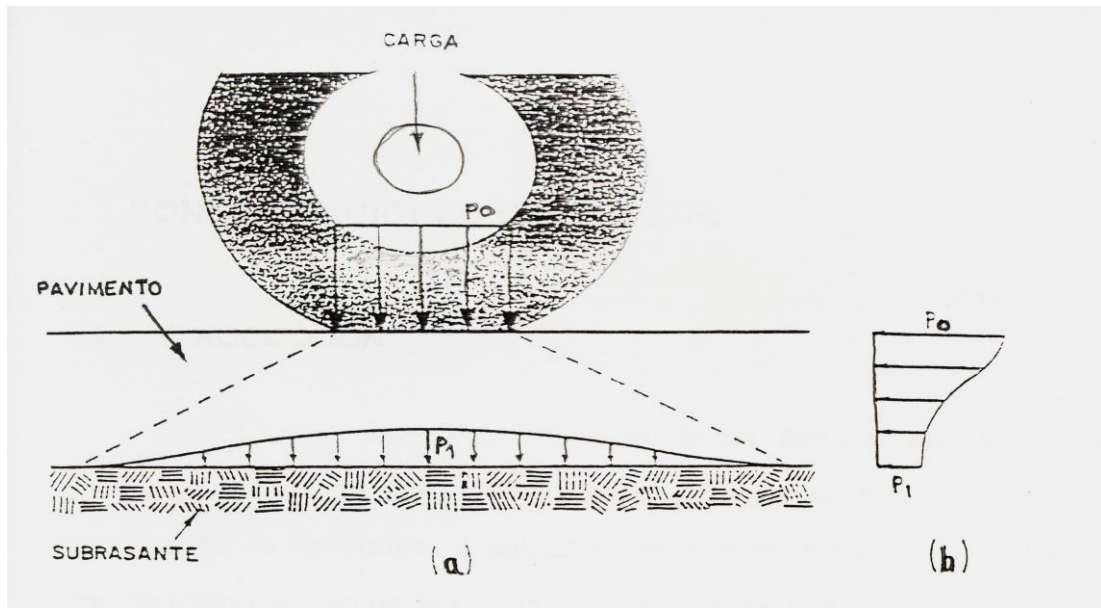
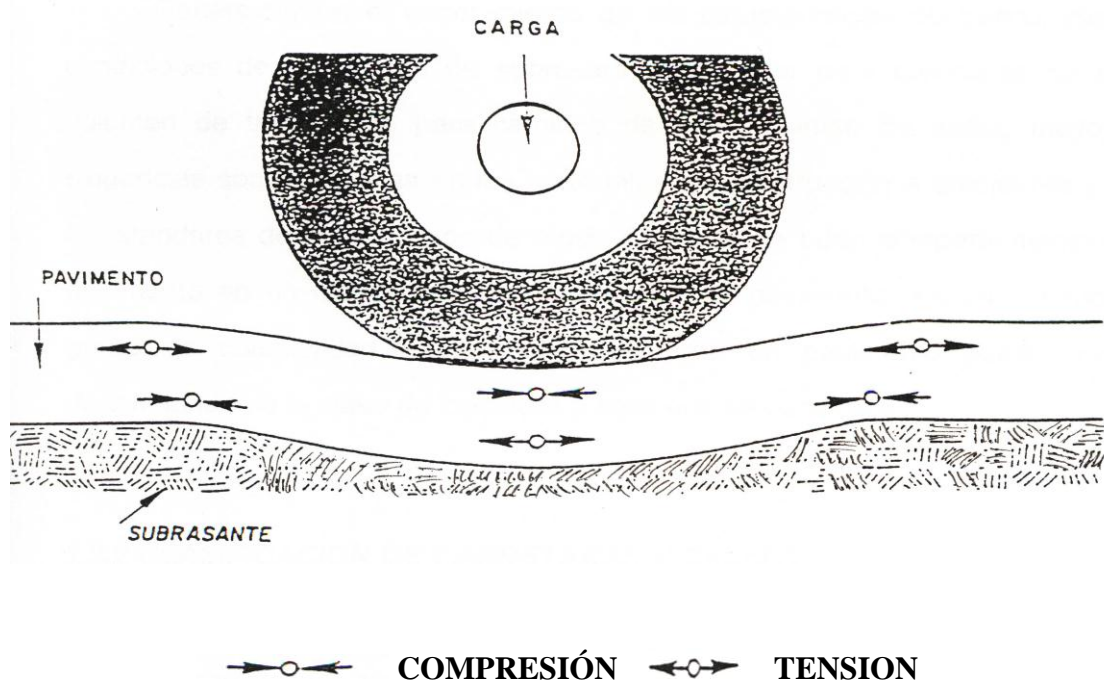


FIGURA 6.16 LA DEFLEXIÓN DEL PAVIMENTO ORIGINA ESFUERZOS DE TENSION Y COMPRESIÓN EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.



6.3.2 Consideraciones del diseño

6.3.2.1 Introducción

Esta sección discute la selección de los factores apropiados para el diseño estructural de pavimentos flexibles. Se presenta información sobre la clasificación de vialidades, la selección de tipos de materiales y su reacción al tipo de tráfico, el uso de la construcción en etapas y la comparación económica de diferentes alternativas. Los métodos para definir detalladamente cada uno de los factores de diseño son presentados en las secciones respectivas.

Generalmente, el conocimiento de las características de tráfico, clima, condiciones de los suelos de subrasante, es mayor para carreteras de alto volumen de tráfico que para caminos de bajo volumen de tráfico, mayores exigencias son requeridas en los materiales de construcción a emplearse y en los estándares de construcción de modo de lograr un buen comportamiento del pavimento en un mayor período de servicio del pavimento. En tal sentido el grado de complejidad aplicado al diseño de un pavimento puede variar dependiendo de la clase de carretera o calle que se considere.

6.3.2.2 Clasificación de carreteras y calles

La Administración Federal de Caminos Norteamericana (FHWA) clasifica a las carreteras y calles con un sistema de clasificación funcional que puede ser de ayuda para determinar apropiadamente los factores de tráfico y otras variables de diseño necesarias. La clasificación funcional consiste en organizar las carreteras y calles en diferentes

clases o sistemas, de acuerdo al tipo de servicio que estas proporcionan, los cuales se muestran en la Tabla 6.13:

TABLA 6.13	
<i>SISTEMAS RURALES</i>	<i>SISTEMAS URBANOS</i>
Sistema de Arterias Principales	Sistema de Arterias Principales
<ul style="list-style-type: none"> - Interestatales - Otras arterias principales 	<ul style="list-style-type: none"> - Interestatales - Otras autopistas - Otras arterias principales
Sistema de Arterias Menores	Sistema de Arterias de Calles Menores
Sistema Colector	Sistema Colector de Calles
<ul style="list-style-type: none"> - Alimentadores mayores - Alimentadores menores 	
Sistema Local	Sistema Local de Calles

6.3.2.3 Selección de variables de diseño

En lo posible, las propiedades de los suelos de subrasante y materiales de construcción, los valores de tráfico, los factores climáticos y otras variables de diseño deben basarse en estudios de datos reales. Sin embargo, en muchos casos y particularmente para caminos secundarios y calles, la información necesaria no esta disponible. Para estos casos el manual presenta guías apropiadas en las respectivas secciones.

Algunas recomendaciones de valores de las variables de diseño varían según la clasificación de la vialidad o del nivel de tráfico de diseño. Cuanto mayor es el tráfico, se seleccionan valores más conservativos resultando por tanto estructuras de mayor espesor. Por ejemplo, la resistencia de diseño de los suelos de subrasante recomendado

es más bajo cuanto menor es el tráfico. Por otro lado, los requerimientos de espesor mínimo de mezcla asfáltica es también una función del nivel del tráfico y el tipo de base.

Si el conocimiento de las propiedades de los suelos de subrasante y de los materiales de las capas de pavimento es escaso, y si el control de calidad de la construcción es inadecuado, es probable que el pavimento resultante tenga una calidad variable y por ende un comportamiento heterogéneo. Cuanto mayor es la variabilidad del pavimento construido, existirá una mayor probabilidad de fallas prematuras, dando lugar a mayores costos de mantenimiento. Además la selección del tipo de base puede afectar el comportamiento del pavimento.

6.3.2.4 Construcción por etapas.

Existen numerosas situaciones de tipos de tráfico donde es apropiado considerar la construcción en etapas. Un ejemplo de estos son calles en una nueva colonia. En este caso, puede construirse la base asfáltica para satisfacer la demanda del tráfico de construcción y la fase final del proyecto colocar la capa asfáltica de superficie. Otro ejemplo, lo constituye una vía en la que se prevé un aumento considerable de tráfico en el futuro. Una ventaja importante de la construcción por etapas radica en la posibilidad de corregir fallas al nivel de la subrasante o bases causadas por el tráfico, antes de proceder a colocar las capas remanentes. La colocación de estas capas finales permite conseguir un mejor acabado superficial por un período más largo.

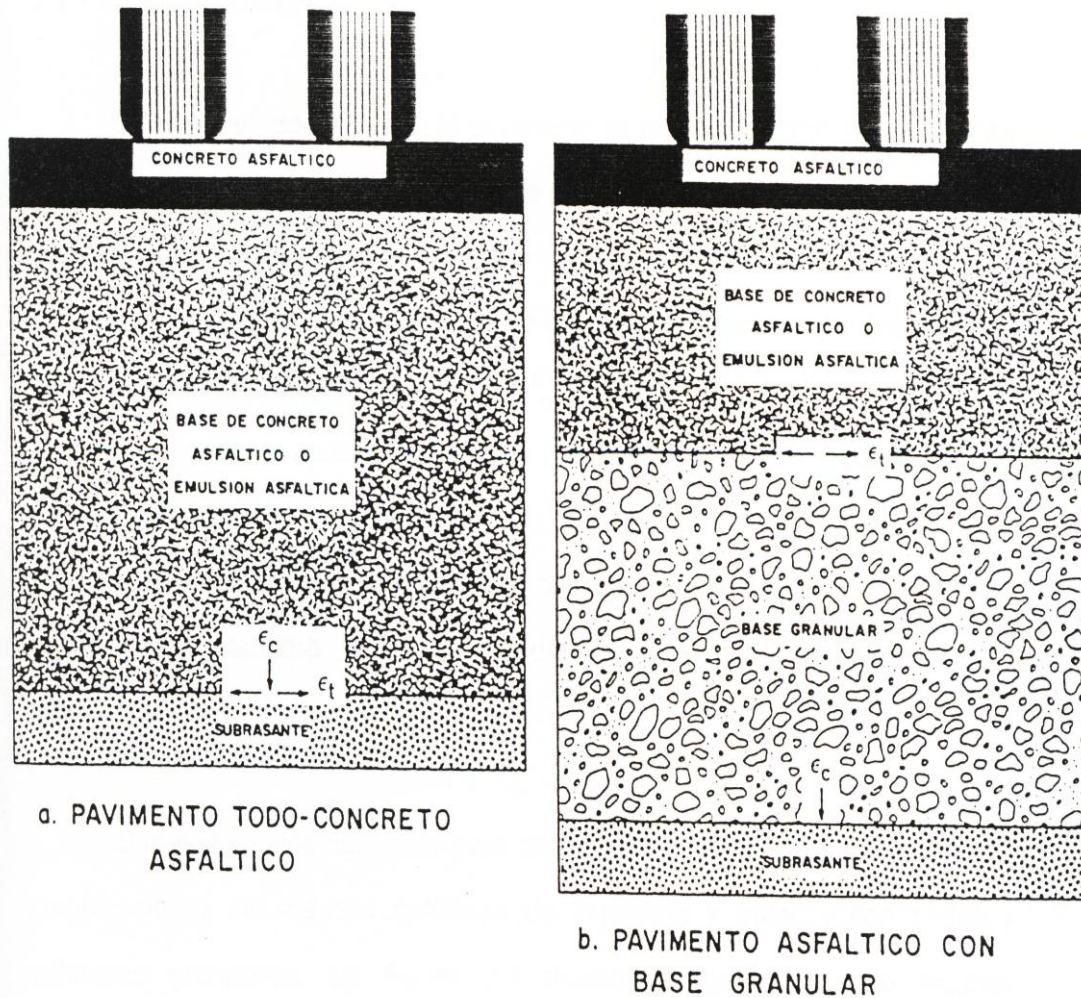
6.3.2.5 Comparaciones económicas.

Frecuentemente, pero no siempre, la selección del tipo de base o la decisión de usar la construcción por etapas se basa en un análisis económico de las alternativas viables.

El procedimiento adoptado para la comparación de alternativas utiliza el concepto del Valor Presente Neto. En este procedimiento, los costos de inversión inicial y futuros se reducen a su "Valor Presente Neto", sin embargo, el "menor costo inicial o total" no es siempre la base más lógica para tomar decisiones. Una de las razones fundamentales para proponer la construcción en etapas, por ejemplo, es que las condiciones futuras de tráfico puedan ser desconocidas.

Pero las comparaciones económicas no serán tomadas en cuenta para la realización de este trabajo.

FIGURA 6.17 LOCALIZACIÓN DE LAS DEFORMACIONES A CONSIDERAR EN EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO



6.3.3 Principios de diseño

6.3.3.1 Base de diseño

En este método de diseño el pavimento es modelado como un sistema de multicapas elásticas. El material de cada capa es caracterizado por su Módulo de Elasticidad y su coeficiente de Poisson. El tráfico aplicado al pavimento se expresa en un número de

repeticiones de un eje simple con ruedas duales y una carga de 18,000 libras (80 KN).

En el análisis, cada rueda dual es representado por dos áreas circulares con un radio de 115 mm (4.52") y una distancia entre centros de 345 mm (13.51"), resultando una presión de contacto de 483 KPa (70 psi). Esta configuración estándar de carga puede ser modificada fácilmente en el programa DAMA.

El método puede ser usado para diseñar pavimentos asfálticos con varias combinaciones de mezclas asfálticas de superficie y base, y con bases y subbases granulares. La Figura 6.17 muestra esquemáticamente algunas secciones típicas de pavimentos.

Los pavimentos todo-concreto asfáltico (Full-Depth) son modelados como un sistema de 3 capas, mientras que pavimentos con capas granulares son modelados como un sistema de cuatro capas.

La subrasante (capa inferior bajo el pavimento) se asume infinita en la dirección vertical y horizontal. Las capas del pavimento, son consideradas horizontalmente infinitas.

Asimismo se asume que existe una continuidad total (fricción total) en las interfaces entre las capas.

6.3.3.2 Criterios de diseño

En la metodología adoptada para este capítulo, se asume que la carga en la superficie del pavimento produce 2 deformaciones unitarias que son consideradas críticas para el diseño (ver Figura 6.17). Estas deformaciones unitarias son:

- La deformación unitaria horizontal de tensión en el fondo de la capa asfáltica más profunda, denominada, ϵ_t .

- La deformación unitaria vertical de compresión en la parte superior de la capa de subrasante, denominada ϵ_c .

Si la deformación unitaria horizontal es excesiva se producirán fisuras en la capa asfáltica, mientras que si la deformación unitaria vertical es excesiva, se producirán deformaciones permanentes en la superficie del pavimento (ahuellamiento) por sobrecargar la subrasante. Deformaciones excesivas en las otras capas tratadas son controladas imponiendo ciertos límites en las propiedades de los materiales.

Para desarrollar los criterios de diseño, se calcularon las deformaciones unitarias y usando el programa de cómputo llamado DAMA.

DAMA está basada en el programa de cómputo desarrollado por la Chevron para el análisis elástico de esfuerzos y deformaciones unitarias de un sistema de N-Capas. Dicho programa puede considerar una amplia variedad de características de materiales, condiciones de carga y condiciones ambientales.

6.3.3.2.1 Caracterización de materiales.

Todos los materiales son caracterizados por un Módulo de Elasticidad (también llamado Módulo Dinámico, para el caso de mezclas asfálticas o Módulo de Resiliencia para el caso de suelos y materiales granulares) y un coeficiente de Poisson. Valores específicos son seleccionados en base a experiencia y estudios extensos de datos de ensayos.

6.3.3.2.1.1 Concreto asfáltico.

El Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas es fuertemente dependiente de la temperatura. En el desarrollo de las curvas de diseño de este manual se utilizó la relación

módulo-temperatura de una mezcla típica de alta calidad. Para simular el efecto de la temperatura y sus variaciones durante el año, se utilizaron tres distribuciones típicas de la temperatura promedio mensual del aire, que representan tres regiones climáticas típicas de Los Estados Unidos de Norteamérica. Los valores apropiados de "módulos dinámicos" fueron seleccionados luego de un estudio exhaustivo de las relaciones módulo-temperatura y las propiedades de los asfaltos.

6.3.3.2.1.2 Materiales granulares.

Los Módulos de Resiliencia de los materiales granulares varían con las condiciones de esfuerzo en el pavimento. Los valores utilizados en el desarrollo de las gráficas de diseño varían al menos entre 15,000 psi (103 Mpa) hasta más de 50,000 psi (345 Mpa).

6.3.3.2.1.3 Consideraciones ambientales.

En adición a los efectos de las variaciones mensuales de temperatura sobre los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas, las gráficas de diseño también toman en consideración los efectos ambientales sobre los Módulos de Resiliencia de la subrasante y las capas granulares. En el caso de la subrasante, este se corrigió utilizando un Módulo Resiliente incrementado para representar la época de helada en el invierno y un Módulo Resiliente reducido para representar la época de descongelamiento en primavera. En forma similar se consideraron los efectos ambientales para las bases granulares.

6.3.3.3 Gráficas de diseño.

El programa DAMA fue utilizado para determinar los espesores en función de las dos

deformaciones unitarias críticas descritas en la Sección 6.3.3.2. Para cada condición analizada se obtuvieron 2 espesores, uno para cada deformación unitaria crítica, y el mayor valor fue utilizado para preparar las gráficas de diseño. Por esta razón varias de las gráficas de diseño presentan formas asociadas con 2 criterios diferentes.

En las gráficas de diseño, para ciertos niveles de tráfico, se muestran requerimientos de espesores mínimos. En aquellos casos donde estos espesores mínimos no fueron obtenidos directamente de los cálculos con el programa DAMA, estos fueron seleccionados basados en la experiencia, incluyendo de los caminos de ensayo AASTHO, otros estudios y ediciones anteriores de este manual.

6.3.4 Análisis de tráfico

6.3.4.1 Introducción

El propósito de esta sección es proporcionar métodos para la determinación de datos de tráfico que sigan de insumo al método de diseño estructural presentado en la Sección 6.3.6.

De primordial importancia se consideraban las características del tráfico en un período de tiempo determinado. El tipo y número de ejes de los vehículos así como la magnitud de cargas en cada uno de los ejes son parámetros necesarios de conocer para predecir las cargas que actuaran en el pavimento. Típicamente las cargas en los ejes varían de ligeras (menos de 2,000 Lb (9 KN) a pesadas (mas allá de los límites legales).

Investigaciones han demostrado que es posible representar, el efecto que tiene cualquier eje cargado sobre el comportamiento de un pavimento, a través del "Número de

Repeticiones de Carga Equivalente de un Eje Simple de Carga Estándar de 18,000 Lb (80 KN)", denotado como ESAL. Por ejemplo, un aplicación de un eje simple de 20,000 Lb (80 KN) es igual a 1.5 aplicaciones de un eje simple de 18,000 Lb. Por otro lado, se requieren casi 4 aplicaciones de un eje de 13,000 Lb (58 KN) para igualar una aplicación del eje simple de 18,000 Lb (80 KN).

El procedimiento para el análisis de tráfico presentado en este capítulo incorpora el concepto de ESAL, en forma similar a lo planteado por el Método AASHTO discutido en el ítem anterior (sección 6.1). Por consiguiente, se requiere conocer el número y tipo de vehículos, o el número, tipo y carga de los ejes, pronosticados en la vialidad. En muchos países se acostumbra recolectar estos datos cada uno o dos años. Todos los procedimientos de análisis de tráfico presentado en el presente manual fueron derivados de estudios de conteos de vehículos y datos de cargas efectuados en varios estados de los Estados Unidos de Norteamérica.

6.3.4.2 Estimación del volumen de tráfico.

La estimación de los volúmenes de tráfico iniciales y futuros para el diseño estructural de pavimentos requiere de un estudio y análisis exhaustivos. La información presentada en esta sección puede ser usada para este propósito.

6.3.4.2.1 Método de análisis.

Para comparar diversas alternativas de pavimentos es preciso seleccionar un período de tiempo para el análisis económico. Esto se conoce como el Período de Análisis, el cual es discutido en detalle en "Análisis Económico" el cual no se tocará en este documento.

6.3.4.2.2 Clasificación y número de vehículos

El análisis de tráfico usado en este capítulo, requiere un estimativo del número de vehículos de diferentes tipos, tales como automóviles, buses, camiones con y sin acoples, etc. que se prevean en la vía. Toda esta información debería estar disponible para ser usada en el diseño estructural.

Cuando no hay disponibilidad de datos de conteo y clasificación de tráfico, estimados pueden ser adoptados empleando los datos presentados en la Tabla 6.14, "Distribución de Camiones en Diferentes Clases de Carreteras-U.S.A.". Esta tabla copila los resultados obtenidos por varios estados con la colaboración de la FHWA. El margen de porcentajes en la Tabla 6.14 indica el rango probable en los Estados Unidos. En algunos casos individuales pueden presentarse valores mayores o menores que el rango.

Datos estadísticos para el año 1986 indican que el volumen de vehículos pesados promedio en todos los tipos de carreteras de Estados Unidos fue de 7% del volumen total. Regionalmente puede esperarse un rango entre 2 o más del 25%. Un 10% de camiones pesados es común en autopistas urbanas con una variación entre 5 y 15%. Durante las horas pico el porcentaje de vehículos pesados, dicho porcentaje es cerca del 50% del porcentaje diario de vehículos pesados en arterias urbanas y varía entre 50 y 65% en carreteras.

El uso de la información de tráfico local es recomendado, estando dicho tráfico sujeto a variaciones, por tanto precauciones deben ser tomadas para la recolección y análisis de datos.

⁴⁵ Ibidem

DISTRIBUCION DE VEHICULOS PESADOS EN DIFERENTES CLASES DE CAMINOS EN LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA

TABLA 6.14⁴⁵

TIPO DE VEHICULO	PORCENTAJE DE VEHICULOS PESADOS																		
	SISTEMA RURAL							SISTEMA URBANO											
	INTER ESTATAL	OTRA PRINCIPAL	ARTERIA MENOR	COLECTOR MAYOR	COLECTOR MENOR	RANGO	INTER ESTATAL	OTRA AUTOPISTA	OTRA PRINCIPAL	ARTERIA MENOR	COLECTOR	RANGO	INTER ESTATAL	OTRA AUTOPISTA	OTRA PRINCIPAL	ARTERIA MENOR	COLECTOR	RANGO	
*Vehiculos Pesados Simples																			
2-ejes, 4 ruedas	43	60	71	73	80	43-80	52	66	67	84	86	52-86	52	66	67	84	86	52-86	
2-ejes, 6 ruedas	8	10	11	10	10	8-1	12	12	15	9	11	9-15	12	12	15	9	11	9-15	
3-ejes o más	2	3	4	4	2	2-4	2	4	3	2	<1	<1-4	2	4	3	2	<1	<1-4	
Todas las Unidades Simples	53	73	86	87	92	53-92	66	82	85	95	97	66-97	66	82	85	95	97	66-97	
*Vehiculos Pesados Múltiples																			
4 ejes-0 menos	5	3	3	2	2	2-5	5	5	3	2	1	1-5	5	5	3	2	1	1-5	
5-ejes **	41	23	11	10	6	6-41	28	13	12	3	2	2-28	28	13	12	3	2	2-28	
6-ejes o más **	1	1	<1	1	<1	<1-1	1	<1	<1	<1	<1	<1-1	1	<1	<1	<1	<1	<1-1	
Todas la s unidades múltiples	47	27	14	13	8	8-47	34	18	15	5	3	3-34	34	18	15	5	3	3-34	
*Todos los vehiculos pesados	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100		100	100	100	100	100		

* Compilado en base a datos de la División de Estadísticas de la U.S. Federal Highway Administration

** Incluyendo combinaciones de trailers en algunos estados

6.3.4.2.3 Carril de diseño

Para calles y carreteras de 2 carriles, el carril de diseño puede ser cualquiera de los carriles de la vía mientras que para vías de múltiples carriles se usa generalmente el carril externo. Bajo ciertas condiciones es probable que haya un menor tráfico de camiones en una dirección. En muchas localidades es posible que los camiones cargados circulen en una dirección, mientras que los camiones vacíos en la otra. A falta de información precisa puede usarse la guía presentada en la Tabla 6.15 para determinar la proporción de camiones en el carril de diseño.

<i>NUMERO DE CARRILES (DOS DIRECCIONES)</i>	<i>PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS EL CARRIL DE DISEÑO</i>
2	50
4	45 (35-48)*
6 ó más	40 (25-48)*

* Copilado en base a datos de la División de Estadísticas de la U.S. Federal Highway Administration.

6.3.4.2.4 Período de diseño

Un pavimento puede ser diseñado para soportar el efecto acumulativo del tráfico durante cualquier período de tiempo. El período seleccionado, en años, para el cual se diseña el pavimento se denomina Período de Diseño. Al término de este período puede esperarse que el pavimento requiera de trabajos rehabilitación, usualmente a través de un refuerzo

asfáltico, para devolverle su adecuado nivel de servicio. Entonces, no debe confundirse Período de Diseño con Vida Útil o Período de Análisis.

La Vida Útil de un pavimento puede extenderse indefinidamente por medio de refuerzos asfálticos u otras medidas de rehabilitación, hasta que la vía sea abandonada o se tome obsoleta, ya sea por cambios de rasante, alineamiento u otros factores. Período de Análisis en cambio es un término empleado para el caso de evaluaciones económicas como se indicó anteriormente.

6.3.4.2.5 Capacidad de la carretera

Es importante considerar el número de carriles necesarios para satisfacer los volúmenes de tráfico inicial y durante el período de diseño.

6.3.4.2.6 Tasa de crecimiento del tráfico

El pavimento debe diseñarse para servir adecuadamente la demanda de tráfico durante un período de años. El crecimiento del tráfico (positivo o negativo) debe anticiparse para determinar los requerimientos estructurales de la vía. Registros históricos de tráfico de vialidades similares a aquella bajo estudio así como de programas de desarrollo comunal o regional (población) pueden servir como base para la estimación del crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento del tráfico en forma global aparenta no ser marcadamente diferente en zonas urbanas o rurales; sin embargo, debido a que las tasas de crecimiento promedio están basadas en el total de kilómetros viajados por los vehículos, es aconsejable, en lo posible, determinar separadamente la tasa de crecimiento para vehículos pesados y livianos.

El crecimiento normal en los Estados Unidos varía entre 3 y 5% por año (compuesto), pero con nuevas carreteras o zonas de desarrollo, esta tasa puede ser de mayor magnitud. En Estados Unidos se han sugerido tasas de crecimiento entre 4 y 9% para carreteras rurales y de 8 a más del 10% para algunas autopistas interestatales. Al aplicar la tasa de crecimiento hay que evitar exceder capacidad de vehículos de la vía ya que esto acarrearía un diseño innecesariamente conservativo.

La tasa de crecimiento puede incluirse en el diseño empleándose los factores de crecimiento mostrados en la Tabla 6.16. Estos factores, multiplicados por el volumen de tráfico del primer año (ESAL primer año), proporcionan el volumen total de carga anticipado durante el Período de Diseño (ESAL).

TABLA 6.16

FACTOR DE CRECIMIENTO *

PERIODO DE DISEÑO (AÑOS - n)	TASA DE CRECIMIENTO ANUAL PORCENTAJE (r)									
	SIN CRECIMIENTO	2	4	5	6	7	8	10		
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
2	2.0	2.04	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.1		
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31		
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64		
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11		
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72		
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49		
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.9	10.26	10.64	11.44		
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58		
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94		
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53		
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38		
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52		
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97		
15	15.0	17.29	20.02	21.08	23.28	25.13	27.15	31.77		
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95		
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55		
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.0	37.45	45.6		
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16		
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.0	45.76	57.28		
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35		
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49		
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02		

* FACTOR= $(1+r)^n - 1/r$, donde r=tasa de crecimiento/100+0. Si la tasa de crecimiento anual es cero, el Factor es igual al Período de Diseño.

6.3.4.3 Estimación del ESAL

El análisis de tráfico permite determinar el "Número de Repeticiones de Carga Equivalente de un Eje Simple de Carga Estándar de 18,000 lb. (80 KN)", ESAL, valor que es empleado en laminación de los espesores del pavimento. La siguiente terminología es utilizada:

- Factor de Vehículo: Es el número de ESAL que contribuye una pasada de un vehículo dado.
- Factor de Carga Equivalente: Es el número de ESAL que contribuye una pasada de un eje de carga dado.
- Número de Vehículo: El número total de vehículos considerados.

El valor de ESAL es calculado multiplicando, para cada tipo de vehículo de carga, el número de vehículos por el Factor de Vehículo:

$$ESAL \sum_{i=0}^{i=n} (\text{Número de Vehículos Clase } x \text{ Factor de Vehículo Clase}).$$

Los factores de vehículo se determinan de los datos de distribución de los grupos de carga de los ejes usando los factores de carga equivalente:

$$\text{FACT. DE VEHÍCULO} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} (\text{Número de Ejes } x \text{ Factor de Carga Equivalente})}{\text{Número de Vehículos}}$$

Los factores de carga equivalente pueden obtenerse de la Tabla 6.17. La Figura 6.18a presenta un ejemplo de cálculo de ESAL para varios tipos de ejes de carga, asimismo la Figura 6.18b ilustra el cálculo del factor de vehículo para dos vehículos empleando los factores de carga equivalente de la Tabla 6.17. El procedimiento para calcular el factor de vehículo promedio es mostrado en la Tabla 6.18.

Los factores de vehículo pueden calcularse para vehículos individuales de cualquier tipo. Se recomienda que el factor de vehículo se determine para cada tipo de vehículo (Unidades de 2 ejes, unidades de 3 ejes, unidades trailer de 5 ejes, etc.). La Tabla 6.19 presenta factores de vehículo típicos en carreteras de los Estados Unidos de Norteamérica. Estos fueron calculados de datos recolectados por diferentes estados Norteamericanos y recopilados por la FHWA de estudios realizados en más de 600 localidades en los Estados Unidos durante 1985.

Las características de la presente flota de vehículos esta cambiando gradualmente a medida que los vehículos antiguos son reemplazados por otros de tecnologías mas modernas, los tipos de neumáticos existentes están siendo reemplazados por neumáticos radiales, implicando estos últimos cambios en las presiones de contacto al pavimento, adicionalmente los sistemas de suspensión de los vehículos están siendo mejorados. Todos estos cambios en la industria automotor ha generado muchos esfuerzos de investigación para evaluar el impacto global de estos avances en la vida de los pavimentos creando la posibilidad de establecer nuevos factores de carga equivalente en un futuro.

El mayor factor de vehículo promedio mostrado en la Tabla 6.19 es de 2.21. Cabe

señalar que factores de vehículo mayores han sido reportados en vías con elevados volúmenes de vehículos extremadamente cargados. Bajo ciertas circunstancias, tales como caminos de acceso a zonas de operaciones comerciales pesadas, operaciones mineras o zonas de extracción maderera, los factores de vehículo exceden el valor de 5.

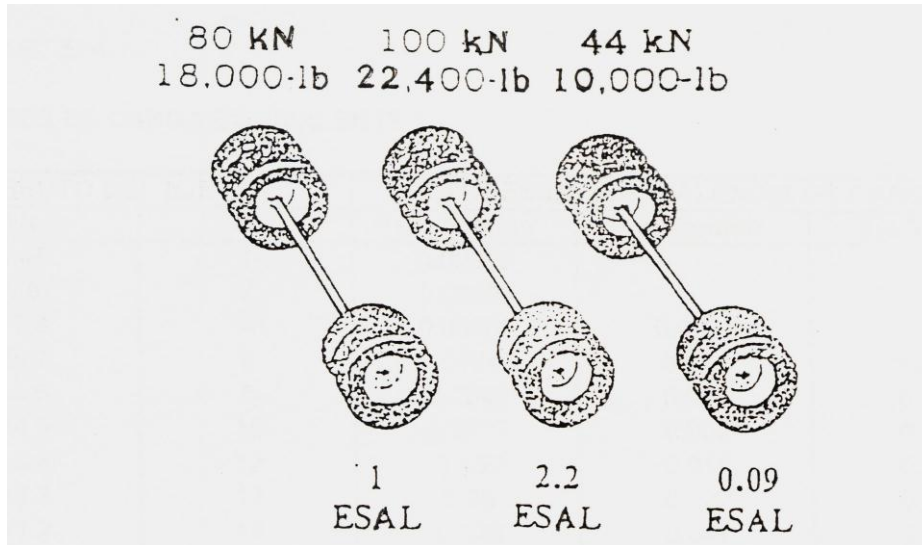
6.3.4.4 Determinación del ESAL de diseño.

Los siguientes pasos delimitan el procedimiento para determinar el ESAL de diseño:

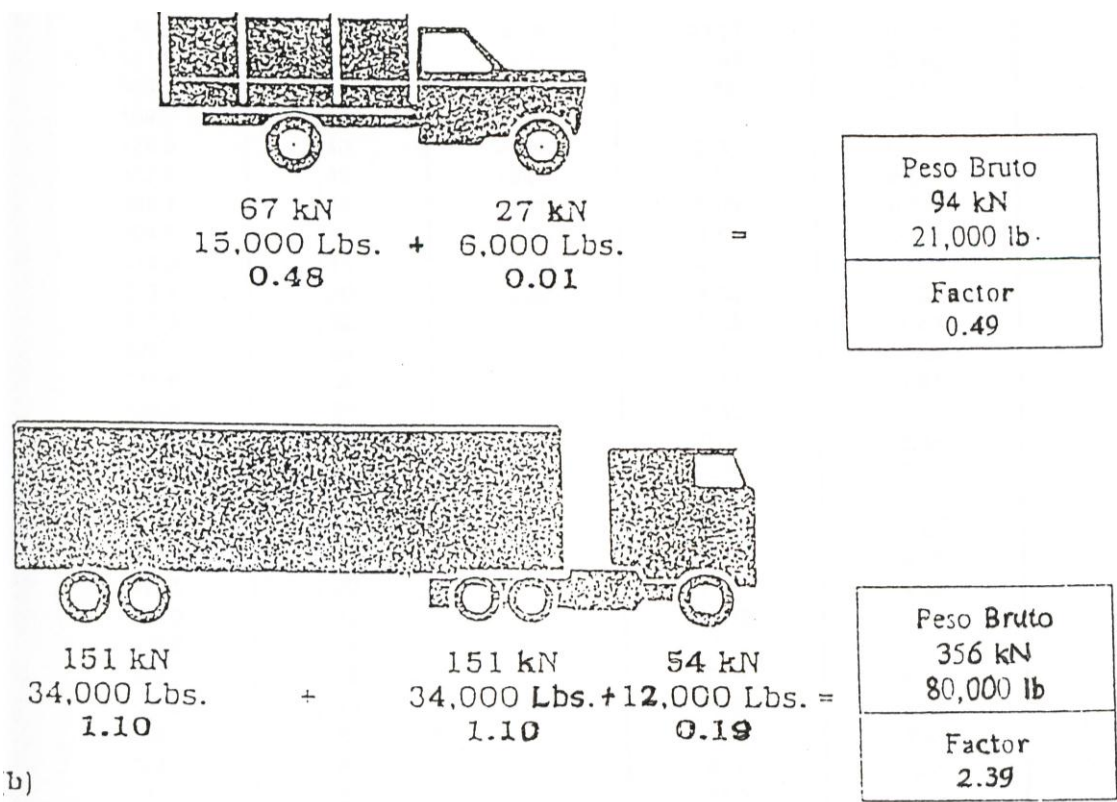
1. Determine el número promedio de cada tipo de vehículo anticipado en el carril de diseño durante el primer año de servicio.
2. Determine, de los datos de carga de eje, o seleccione de la Tabla 6.19, un factor de vehículo para cada tipo de vehículo identificado en el paso (1).
3. Seleccione, de la Tabla 6.16, para el período de diseño adoptado y la tasa de crecimiento anual, un factor de crecimiento para todos los vehículos o factores separados para cada tipo, según sea apropiado.
4. Multiplique el número de vehículos de cada tipo por el factor de vehículo y el factor de crecimiento respectivos determinados en pasos (2) y (3).
5. Sume los valores obtenidos para determinar el ESAL de diseño.

FIGURA 6.18 FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.

a)



b)



b)

TABLA 6.17
FACTORES DE CARGA EQUIVALENTE⁴⁶

PESO BRUTO DEL EJE		FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA		
kN	lb	Eje Simple	Eje Tandem	Eje Tridem
4.45	1	0.00002		
8.9	2	0.00008		
17.8	4	0.00209	0.0003	
26.7	6	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8	0.0343	0.003	0.001
44.5	10	0.0877	0.007	0.002
53.4	12	0.189	0.014	0.003
62.3	14	0.36	0.027	0.006
71.2	16	0.623	0.047	0.011
80.0	18	1.000	0.077	0.017
89.0	20	1.51	0.121	0.027
97.9	22	2.18	0.180	0.04
106.8	24	3.03	0.260	0.057
115.6	26	4.09	0.364	0.08
124.5	28	5.39	0.495	0.109
133.4	30	6.97	0.658	0.145
142.3	32	8.88	0.857	0.191
151.2	34	11.18	1.095	0.246
160.1	36	13.93	1.38	0.313
169.0	38	17.2	1.70	0.393
178.0	40	21.08	2.08	0.487
187.0	42	25.64	2.51	0.597
195.7	44	31.00	3.00	0.723
204.5	46	37.24	3.55	0.868
213.5	48	44.50	4.17	1.033
222.4	50	52.88	4.86	1.22
231.3	52		5.63	1.43
240.2	54		6.47	1.66
249.0	56		7.41	1.91
258.0	58		8.45	2.20
267.0	60		9.59	2.51
275.8	62		10.84	2.85
284.5	64		12.22	3.22
293.5	66		13.73	3.62
302.5	68		15.38	4.05
311.5	70		17.19	4.52
320.0	72		19.16	5.03
329.0	74		21.32	5.57
338.0	76		23.66	6.15
347.0	78		26.22	6.78
356.0	80		29.0	7.45
364.7	82		32.0	8.2
373.6	84		35.3	8.9
382.5	86		38.8	9.8
391.4	88		42.6	10.6
400.3	90		46.8	11.6

⁴⁶ Del Apéndice D de AASTHO Guía para Diseño de Estructuras de Pavimentos, 1986.

TABLA 6.18

EJEMPLO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CARGA EN LOS EJES EN LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMÉRICA.

(Basado en Censos de Vehículos Pesados y Datos de Pesos para Carreteras Rurales Interestatales Típicas)

CARGA EN LOS EJES		No. DE EJES POR 1000 VEHICULOS (2)	FACTOR DE CARGA EQUIVALENTE (3)	ESAL (2)x(3) (4)
kN '(1)	(1000 lb)			
Ejes Simples				
<13.35	(<3)	604	0.0002	0.1
13.35-31.15	(3-7)	557	0.006	3.3
31.35-31.15	(7-8)	140	0.028	3.9
35.6-53.4	(8-12)	493	0.087	42.9
53.4-71.2	(12-16)	154	0.360	55.4
71.2-80.0	(16-18)	75	0.811	60.8
80.0-89.0	(18-20)	33	1.25	41.2
89.0-97.8	(20-22)	5	1.84	9.2
97.8-106.8	(22-24)	2	2.60	5.2
106.8-115.6	(24-26)	1	3.56	3.6
115.6-133.5	(26-30)	1	5.42	5.4
Ejes Tandem				
<26.7	(<6)	22	0.010	0.2
26.7-53.4	(6-12)	227	0.010	2.3
53.4-80.0	(12-18)	162	0.037	6.0
80.0-106.8	(18-24)	108	0.150	16.2
106.8-133.5	(24-30)	140	0.429	60.1
133.5-142.3	(30-32)	58	0.757	43.9
142.3-151.2	(32-34)	25	0.97	24.3
151.2-160.0	(34-36)	6	1.23	7.4
160.0-169.0	(36-38)	3	1.54	4.6
169.0-178.0	(38-40)	1	1.89	1.9
178.0-187.0	(40-42)	1	2.29	2.3
187.0-195.7	(42-44)	1	2.75	2.8
195.7-204.5	(44-46)	1	3.27	3.3
204.5-222.4	(46-50)	1	4.17	4.2
>222.4	>50)	1	5.2	5.2
(usar 226.8 (51)				ESAL = 415.7

TABLA 6.19

DISTRIBUCION DE LOS FACTORES DE VEHICULOS PARA DIFERENTES CLASES DE CAMINOS Y VEHICULOS - ESTADOS UNIDOS*

TIPO DE VEHICULO	FACTORES DE VEHICULO PESADO													
	SISTEMA RURAL							SISTEMA URBANO						
	INTER ESTATAL	OTRA PRINCIPAL	ARTERIA MENOR	COLECTOR MAYOR	COLECTOR MENOR	RANGO	INTER ESTATAL	OTRA AUTOPISTA	OTRA PRINCIPAL	ARTERIA MENOR	COLECTOR	RANGO		
*Vehiculos Pesados Simples	0.003	0.003	0.003	0.017	0.003	0.003-0.0017	0.002	0.0015	0.002	0.006		0.006		
2-ejes, 4 ruedas												0.015		
2-ejes, 6 ruedas	0.21	0.25	0.28	0.41	0.19	0.19-0.41	0.17	0.13	0.24	0.23	0.13	0.13-0.24		
3-ejes o más	0.61	0.86	1.06	1.26	0.45	0.45-1.26	0.61	0.74	1.02	0.76	0.72	0.61-1.02		
Todas las Unidades Simples	0.06	0.08	0.08	0.12	0.02	0.03-0.12	0.05	0.06	0.09	0.04	0.16	0.04-0.16		
*Vehiculos Pesados Múltiples														
4 ejes-0 menos	0.62	0.92	0.62	0.37	0.91	0.37-0.91	0.98	0.48	0.71	0.46	0.4	0.40-0.98		
5-ejes **	1.09	1.25	1.05	1.67	1.11	1.05-1.67	1.07	1.17	0.97	0.77	0.63	0.63-1.17		
6-ejes o menos**	1.23	1.54	1.04	2.21	1.35	1.04-2.21	1.05	1.19	0.9	0.64		0.64-1.19		
Todas las unidades múltiples	1.04	1.21	0.97	1.52	1.08	0.97-1.52	1.05	0.96	0.91	0.67	0.53	0.53-1.05		
*Todos los vehiculos pesados	0.52	0.38	0.21	0.3	0.12	0.12-0.52	0.39	0.23	0.21	0.07	0.24	0.07-0.39		

* Compilado en base de datos de la división de Estadística de Carreteras de la U.S. Federal Highway Administration.

** Incluye combinaciones de full-trayler en algunos estados

La Figura 6.19 muestra un ejemplo de la determinación del ESAL de diseño para una carretera rural de 4 carriles siguiendo el procedimiento ya indicado.

FIGURA 6.19
EJEMPLO DE HOJA DE TRABAJO PARA EL ANÁLISIS DE TRÁFICO.

PROYECTO: CAMINO RURAL DE 4 CARRILES		PERIODO DE DISEÑO 20 AÑOS.		
TIPO DE VEHICULO	No DE VEHICULOS (Por año) (1*)	FACTOR DE VEHICULO 2	4% TASA DE CRECIMIENTO 3	ESAL (1X2X3) 4
Unidades simples				
2 ejes, 4 llantas	84,700 x	0.003 x	29.8 =	7,600
2 ejes, 6 llantas	15,800 x	0.21 x	29.8 =	98,900
3 o más ejes	4,000 x	0.61 x	29.8 =	72,700
Todos los simples	104,500 x		Sub-Total	179,200
Semi-traylers y combinaciones				
4 ejes o menos	9,800 x	0.62 x	29.8 =	181,100
5 ejes	80,800 x	1.09 x	29.8 =	2,624,500
6 ejes o más	7,000 x	1.23 x	29.8 =	256,600
Todas las combinaciones	92,600 x		Sub-Total	3,062,200
Todos los vehiculos	107,100 x	ESAL DE DISEÑO	Total	3,241,400

*Basado en un TPDA = 5,000 durante el primer año, 45% en el carril de diseño, 24% vehículos pesados.

Otro factor que debería tenerse en consideración para la determinación del ESAL es el efecto perjudicial de las altas presiones de contacto de los neumáticos. Si las medidas actuales de la presión de inflado de los neumáticos indican valores significativamente por encima del valor de la condición estándar de 70 psi, entonces los factores de carga equivalente de la Figura 6.20 deberían de emplearse para modificar el valor inicial del ESAL de diseño debido a este incremento en el nivel de esfuerzos. Este ajuste es efectuado multiplicando el ESAL de diseño inicial por el factor de ajuste ESAL (de la línea apropiada de espesores de concreto asfáltico mostradas en la Figura 6.20) para cada vehículo individual o la condición del vehículo promedio. Normalmente la presión de contacto de los neumáticos es igual al 90% de la presión de inflado.

6.3.4.5 Calles residenciales, zonas de parqueo y hombros.

Carreteras y calles que transportan un gran volumen de tráfico de automóviles con un número bajo de camiones requieren una atención especial. A continuación se presentan guías para determinar el ESAL de diseño en estas arterias.

6.3.4.5.1 Calles residenciales y zonas de parqueo

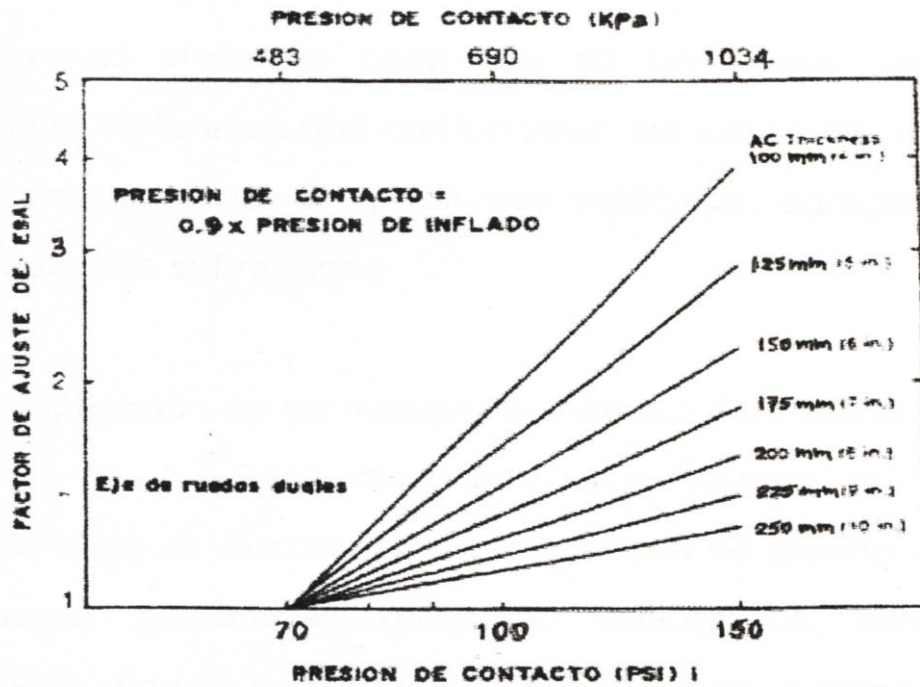
Estas áreas cuentan con casi un 100% de tráfico liviano. Un diseño basado en los factores de carga equivalente de la Tabla 6.17 puede resultar en una estructura que es muy débil para soportar tráfico pesado ocasional como buses, recolectores de basura, concreteras, maquinaria de mantenimiento, etc. Por consiguiente se recomienda tratar de hacer un estimativo realista del tráfico futuro de vehículos pesados, caso contrario deben usarse las recomendaciones de espesores mínimo dado en la Sección 6.3.6

Procedimientos de Diseño Estructural.

6.3.4.5.2 Hombros

Los hombros asfálticos son construidos para aumentar la seguridad y servir de refugio durante una parada de emergencia de los vehículos. Así como los hombros deben soportar el tráfico desviado y seguir como carriles temporarios durante operaciones de construcción y mantenimiento. En algunos casos los hombros son empleados como carriles de tráfico lento. Por estas razones, y cuando es posible estimar el tráfico, es recomendable que los hombros sean diseñados usando los principios y procedimientos adoptados por este manual para los carriles de circulación principales. Como mínima protección contra el daño ocasionado por el tráfico pesado se recomienda que el ESAL de diseño para hombros sea por lo menos el 2% del ESAL de diseño del carril de diseño.

FIGURA 6.20



6.3.5 Evaluación de materiales

6.3.5.1 General

Para un tráfico dado, el diseño del pavimento involucra tres pasos:

- Selección de materiales de construcción a ser empleados
- Requerimiento de espesores de cada material seleccionado
- Requerimientos constructivos incluyendo el diseño de mezclas, compactación, entre otros.

Un elemento clave en cada uno de los pasos mencionados es la evaluación de los materiales que conformarán las capas del sistema pavimento-subrasante: Concreto asfáltico, productos asfálticos, agregados para bases y subbases y suelos de subrasante.

En la preparación de su manual, el Instituto del Asfalto ha investigado las propiedades de los posibles materiales a emplearse en la estructura del pavimento y la capa de subrasante. Las gráficas de diseño presentadas en los Anexos fueron preparadas utilizando valores de constantes elásticas adecuadas, así que no es necesario que el usuario las determine.

Definitivamente, la propiedad caracterizadora de la subrasante es el Módulo de Resiliencia (M_R). El procedimiento recomendado para determinar el valor de M_R se describe en el Manual de Suelos (MS-10) del Instituto Americano del Asfalto. Debido a que numerosas agencias no disponen del equipo necesario para efectuar el ensayo del Módulo de Resiliencia, este manual ofrece factores para determinar M_R en base a datos de CBR. Puesto que las correlaciones presentadas son aproximadas, de ser posible, se

recomienda la adquisición del equipo necesario para efectuar el ensayo de Módulo de Resiliencia.

Se advierte que el valor M_R de los suelos de subrasante, depende de la magnitud del esfuerzo bajo la carga de diseño. Los espesores mostrados en las gráficas de diseño de los Anexos, dependen del valor M_R de los suelos de subrasante. En tal sentido, debido cuidado debe ser tomado en cuenta para aproximar la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador, durante el ensayo, a las condiciones de esfuerzos anticipadas en el campo. El método de ensayo recomienda una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador que son razonables para la mayoría de ensayos.

6.3.5.2 Subrasante

6.3.5.2.1 Definición

La subrasante se define como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura del pavimento. La subrasante es llamada a veces "subsuelo" o "suelo de fundación".

6.3.5.2.2 Subrasante mejorada

Una subrasante mejorada es una capa o capas de material mejorado colocado entre el suelo natural y la estructura del pavimento. Puede consistir en un material tratado en sitio o un material importado.

Una subrasante mejorada normalmente no es necesaria en el diseño y construcción de un pavimento Todo-Concreto Asfáltico (Full-Depth). Dicha capa debería ser considerada cuando se encuentra una subrasante que no puede soportar al equipo de construcción. En

tales casos la subrasante mejorada es utilizada como una plataforma de trabajo para la construcción de las capas del pavimento y no afecta el espesor de diseño del pavimento, es decir no es considerada como parte del pavimento. Un estudio de las condiciones en el sitio de trabajo es generalmente requerido para establecer la mejor solución.

6.3.5.2.3 Métodos de evaluación

Las gráficas de diseño empleadas en éste método requieren un valor de Módulo de Resiliencia (M_R) de la subrasante, el cual puede determinarse a través de ensayos en laboratorio. Sin embargo, para facilitar el uso de las gráficas de diseño se presentan correlaciones del valor M_R con valores de:

- CBR de Suelos Compactos-ASTM D 1883 (AASHTO T 193) (Compáctense las muestras de acuerdo a ASTM D 1557 (AASHTO T 180 Métodos B ó D)
- Valor de Resiliencia (R) - ASTM D 2844 (AASHTO Método T 190)

El Módulo de Resiliencia puede estimarse a partir del valor de CBR de acuerdo a la siguiente relación:

$$M_R \text{ (MPa)} = 10.3 \times \text{CBR} \text{ ó } M_R \text{ (psi)} = 1500 \times \text{CBR}$$

El Módulo de Resiliencia puede también estimarse a partir del valor R usando la relación:

$$M_R \text{ (MPa)} = 8.0 + 3.8 \times (\text{Valor R}) \text{ ó } M_R \text{ (psi)} = 1155 + 555 \times (\text{Valor R})$$

Las correlaciones presentadas son aplicables a materiales clasificados como CL, CH, ML, SC, SM y SP según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D 2487) ó A-7, A-6, A-5, A-4 y suelos finos A-2 según el Sistema de Clasificación AASHTO M 145, o aquellos materiales con valores de M_R estimados por debajo de

30,000 psi (207 Mpa). Estas correlaciones no son aplicables a materiales granulares, como subbase o base granular, en tales casos ensayos de laboratorio son necesarios conducir para obtener mayores valores de M_R de la subrasante.

Otras agencias han desarrollado correlaciones entre CBR o Valor R con el Módulo dinámico. Muchas de estas producen valores de M_R menores que aquellos obtenidos con las correlaciones indicadas anteriormente y consecuentemente incrementan los espesores del pavimento. Las gráficas de diseño de este manual asumen las correlaciones indicadas en párrafos anteriores, señalando que debe de tenerse el cuidado debido de no plantear mayores espesores de pavimento en forma innecesaria por emplear otras correlaciones.

6.3.5.2.4 Muestreo y ensayos.

Un plan de muestreo y ensayos debe ser preparado como un paso preliminar en el proceso de diseño. Guías generales para la selección de zonas de muestreo a lo largo de un proyecto se describen en el Apéndice B del Manual de Suelos (MS-10) del Instituto Americano del Asfalto. Dicho manual también proporciona guías para el desarrollo de perfiles longitudinales y para la clasificación de suelos.

La Tabla 6.20 ofrece guías para la preparación de muestras y ensayos de suelos.

Para desarrollar un programa de ensayos de laboratorio que satisfagan las condiciones locales del proyecto es necesario contar con un adecuado juicio ingenieril. Las siguientes guías generales pueden ser de ayuda:

- Ensayar todos los suelos que se espera emplear en los 0.60 m. bajo la estructura del pavimento, en otras palabras bajo el nivel de los niveles de subrasante. En áreas de

relleno, es necesario determinar primero la procedencia del material a emplearse como relleno. Los ensayos deben, en lo posible, presentar la condición de sus suelos de subrasante que probablemente controle el diseño.

Si el perfil estratigráfico de los suelos revela que hay una variación errática de los mismos a lo largo del alineamiento propuesto, por ejemplo uno o más suelos principales se presentan erráticamente, es aconsejable realizar un plan de muestreo al azar dentro de los límites de cada tipo de suelo principal. Si la variación de suelos es sistemática, el alineamiento puede dividirse en tramos con condiciones de suelo similares para proceder con el muestreo.

Es necesario programar un suficiente número de ensayos que permita diseñar los pavimentos para cada tipo de suelo, en cuyo caso es deseable preestablecer la longitud mínima que justifica variaciones en el diseño de los pavimentos. En todo caso, si las longitudes de suelos de subrasante diferentes no son lo suficientemente largos como para justificar diferentes diseños, se hará un sólo diseño del pavimento para la condición del peor tipo de suelo.

Planee un número suficiente de ensayos que permita la selección estadística de los Módulos de Resiliencia de la Subrasante de diseño. De 6 a 8 ensayos son recomendados para cada tipo de suelo.

Si una muestra tiene un valor tan bajo de resistencia que indica presencia de una zona muy débil, deben obtenerse muestras adicionales para determinar los límites de tal zona. Esas zonas pueden requerir un aumento de espesor del pavimento, o el reemplazo del material (subrasante mejorada) para proveer un soporte homogéneo a lo largo de toda la

selección. Los valores obtenidos de los ensayos para estas zonas deberían de omitirse para el cálculo del Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño.

6.3.5.2.5 Selección del modulo de resiliencia de diseño de la subrasante.

Los valores individuales de resiliencia de los suelos de subrasante (de 6 a 8 ensayos) determinados de acuerdo a las recomendaciones de las secciones previas, son utilizadas para determinar el Módulo de Resiliencia de Diseño de la Subrasante. Para cada grupo de valores, M_R debe ser seleccionado en función del tráfico; cuanto mayor es el tráfico menor es el valor de Diseño de M_R esto se hace para obtener un diseño más conservativo para una vía de mayor volumen de tráfico.

El Módulo de Resiliencia de Diseño de la Subrasante (M_R) se define como el Módulo de Resiliencia de un grupo de valores, donde el 60, 75 u 87.5% del total de los valores analizados son mayores o iguales a él. Estos porcentajes se conocen como Valores Percentiles y están relacionados con el tráfico como se indica en la Tabla 6.21.

TABLA 6-20⁴⁷	
LIMITES DE DISEÑO PARA SUBRASANTE	
<i>NIVEL DE TRAFICO (ESAL)</i>	<i>PERCENTIL DE DISEÑO (%)</i>
10 ⁴ o menos	60
ENTRE 10 ⁴ Y 10 ⁶	75
10 ⁶ O MAS	87.5

⁴⁷ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis UES: Jaime Ernesto Carvajal Álvarez, abril 1997

TABLA 6-21⁴⁸

ENSAYOS Y TAMAÑOS DE MUESTRA PARA SUELOS DE SUBRASANTE

NOMBRE DEL ENSAYO	USO	MÉTODO DE ENSAYO		TAMAÑO DE LA MUESTRA	
		AASHTO	ASTM		
Límite Líquido	Clasificación	T 89	D4318	2.5 kg (5 lb)	Para definir la humedad que define el estado plástico y líquido de los suelos.
Límite Plástico	Clasificación	T 90	D4318	2.5 kg (5 lb)	Para definir la humedad que define el estado plástico y semi-sólido de los suelos
Índice Plástico	Clasificación	T 90	D4318	2.5 kg (5 lb)	Para definir el rango de humedad en el cual el suelo se encuentra en estado plástico
Análisis Mecánico	Clasificación	T 88	D422	2.5 kg (5 lb)	Para definir la distribución de tamaño de partículas en el suelo.
Compactación	Relación humedad-densidad	T 180	D1557	11 Kg (25 lb)	Para definir la máxima densidad bajo cierto esfuerzo de compactación y la humedad para poder alcanzar tal densidad
CBR	Para el diseño de espesores	T 193	D1883	7 Kg (15 lb)	Para definir la capacidad de carga del suelo. El resultado es usado para calcular el Módulo de Resiliencia
Valor R	Para el diseño de espesores	T 190	D2844	9 Kg (20 lb)	Para definir la capacidad de carga del suelo. El resultado es usado para calcular el Módulo de Resiliencia
Módulo de Resiliencia M_r	Para el diseño de espesores	Asphalt Institute MS-10	Asphalt Institute MS-10	11 Kg (25 lb)	Para calcular el Módulo de Resiliencia de los suelos de subrasante

AASHTO = American Association of State Highway Transportation and Officials.

ASTM = American Society for Testing and Materials

* Ver también el Manual de Suelos MS-10 del Asphalt Institute.

El procedimiento para determinar el Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño

M_R se ilustra a continuación:

⁴⁸ Estudio y comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y el Instituto Americano del Asfalto-91 (MS-1) para el diseño de pavimentos flexibles. Tesis UES: Jaime Ernesto Carvajal Alvares, abril 1997

Paso 1 Seleccione el tráfico ESAL de diseño de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 6.3.4

Paso 2 Ensaye de 6 a 8 muestras de subrasante de acuerdo a la sección 6.3.5.2.4. Convierta los valores de CBR o valores de M_R según se indicó.

Paso 3 Arregle los valores de M_R en secuencia numérica descendente.

Paso 4 Para cada valor diferente de M_R empezando con el menor valor de M_R compute el número de valores que son Iguales o mayores que aquel. Compute el porcentaje de cada uno de los valores con respecto al total de valores analizados.

Paso 5 Plotee en un gráfico los resultados obtenidos; en el eje de abscisas los valores de M_R y en el eje de coordenadas los porcentajes de Valores Mayores o Iguales.

Paso 6 Trace una curva suave, que mejor se adapte a los puntos ploteados en la gráfica. (Nota: si los resultados están bien distribuidos esta curva debe tener la forma de una "S" donde el 50% percentil debería de estar cerca del valor promedio de los datos analizados).

Paso 7 Lea de la curva el valor de Resiliencia de la subrasante para el valor percentil apropiado. Este es el valor de Módulo de la Subrasante de Diseño M_R .

6.3.5.2.5.1 Ejemplo:

Determine el Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño para las siguientes condiciones:

Paso 1 Tráfico de diseño ESAL = 10^4 , 10^5 y 10^6

Paso 2 Los resultados de 7 ensayos produjeron los siguientes resultados de módulo de Resiliencia:

6,500; 8,500; 9,800; 9,900; 11,600; 15,500 psi.

Paso 3 Los valores percentiles de M_R se calculan como se indica a continuación:

M_r (psi)	NUMERO DE VALORES MAYORES O IGUALES A M_r	PORCENTAJE DE VALORES MAYORES O IGUALES (%)
15.500	1	(1/7) 100=14
11.600	2	(2/7) 100=29
9.900		
9.900	4	(4/7) 100=57
9.800	5	(5/7) 100=71
8.500	6	(6/7) 100=86
6.500	7	(7/7) 100=100

Paso 4 Dibújense los valores obtenidos como se indicó anteriormente, M_R y %

Paso 5 Los valores de Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño M_R para los tres niveles de tráfico dado, usando los percentiles adecuados se obtienen de la curva y son:

ESAL	PERCENTIL (%)	M_R
10^4	60	10,000
10^5	75	9,300
10^6	87.5	8,250

6.3.5.2.6 Requerimientos de compactación de la subrasante.

Para los suelos de subrasante a emplearse en la construcción, deben realizarse ensayos de compactación en el laboratorio para determinar la máxima densidad y humedad práctica a alcanzar en obra. Para los suelos de subrasante dichas características pueden obtenerse empleando el Método AASHTO T 180 (ASTM D 1557- martillo de 10 libras con caída de 18").

Los siguientes criterios de compactación son recomendados para los suelos de subrasante o sobrestantes mejorados en la construcción de pavimentos asfálticos:

- **Suelos cohesivos**

Un mínimo de 95% de la densidad AASHTO T 180 método D para los 300 mm superiores y un mínimo de 90% para todos los rellenos por debajo de la capa de 300 mm. El contenido de humedad para la compactación de suelos cohesivos debe seleccionarse de manera tal que produzca la mayor resistencia remoldeada consistentes con las características de expansión.

Generalmente, los suelos cohesivos no expansivos deberían de compactarse del lado seco, con un contenido de humedad de 1 o 2% por debajo de la humedad óptima de compactación determinada en el laboratorio.

Suelos cohesivos expansivos, por otro lado, deben compactarse del lado húmedo, 1 o 2% por encima de la humedad óptimo de compactación para reducir los efectos de la expansión. En algunos casos puede ser necesario reducir el porcentaje de compactación

requerido para prevenir excesos de expansión. La identificación de suelos expansivos puede efectuarse empleando el Método AASHTO T 258, "Determinación de Suelos Expansivos y Acciones Correctivas".

- **Suelos Friccionantes**

Un mínimo de 100% de la densidad AASHTO T 180 método D para los 300 mm superiores y un mínimo de 95% para todos los rellenos por debajo de la 300 mm. Arenas limpias y gravas que tienen un índice de plasticidad por debajo del 6% y que no se pegan cuando están secos son clasificados como suelos friccionantes. Estos suelos se pueden densificar con cargas vibratorias.

Los requerimientos de compactación deberían de ser lo suficientemente altos para asegurar que el Módulo de Resiliencia obtenido no esté por debajo de aquel definido para el diseño del pavimento. Si se especifica una reducción en los requerimientos de compactación, entonces el valor del Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño debe ser reajustado.

6.3.5.3 Concreto asfáltico para superficie y base

6.3.5.3.1 Requerimientos de materiales para concreto asfáltico.

Las soluciones presentadas en el manual del Instituto Americano del Asfalto están basadas en estudios exhaustivos de la relación Módulo Dinámico -Temperatura de las mezclas de concreto asfáltico denso. En general, no es necesario realizar ensayos sobre el concreto asfáltico para poder usar las gráficas de diseño del presente manual; siempre y cuando se satisfagan los siguientes requerimientos:

- La granulometría de los agregados de la mezcla debe cumplir con los requerimientos para concreto asfáltico del "Especificaciones de Modelo de Construcción para Concreto Asfáltico y otros tipos de plantas mezcladoras (SS-1)", cuando son ensayados de acuerdo a los procedimientos detallados en el "Métodos de Diseño de Mezclas para Concreto Asfáltico y Otros Tipos de Mezclas Calientes (MS-2)", del Instituto del Asfalto.
 - La mezcla de cemento asfáltico y agregados debe ser diseñada para satisfacer los criterios sugeridos en el Manual SS-1, y
 - El concreto asfáltico debe compactarse a la densidad indicada en la siguiente sección.
- Las gráficas de diseño contemplan 2 capas de concreto asfáltico; capa de superficie y base. Es necesario que ambas capas satisfagan los 3 requerimientos ya mencionados. El agregado puede consistir de piedra triturada o sin triturar o una combinación de ambas: sin embargo, el agregado grueso en la capa de superficie debe poseer un mínimo del 50% de agregados triturados.

6.3.5.3.2 Criterios de compactación del concreto asfáltico.

A fin de establecer una densidad de referencia a alcanzar en campo, las mezclas producidas en planta deben ser compactadas en el laboratorio. El Instituto del Asfalto recomienda el siguiente procedimiento:

- Divida la mezcla producida en lotes, cada lote puede considerarse igual a la mezcla producida durante un día.
- Determinar la densidad de referencia a alcanzar para cada lote, midiendo la densidad promedio en laboratorio (por ejemplo especímenes del ensayo Marshall) de muestras

obtenidas al azar de los camiones que transportan la mezcla al sitio de trabajo. Dichas muestras representan sub grupos del lote. Normalmente de 4 a 6 muestras son requeridas por lote.

Determinar la densidad de campo de la mezcla compactada en obra a través la obtención de núcleos o ensayos con densímetro nuclear. Estos ensayos deben realizarse en las secciones correspondientes a aquellas donde se obtuvieron las mezclas de los camiones para obtener la densidad de referencia. Se recomienda determinar 5 valores de densidad en el campo para cada lote de mezcla compactada. La densidad promedio de estos ensayos, representa la densidad de campo.

La densidad de campo debe ser:

- Igual o mayor que el 95% de la densidad de referencia sin que ningún valor individual sea menor que el 94% ó
- Igual o mayor que el 92% de la máxima gravedad específica teórica de la mezcla (ASTM D 2041), sin que ningún valor individual sea menor que el 90%.

Para mayor información consultar la especificación PM-1 "Requerimientos de Aceptación" del "Especificaciones de Modelo de Construcción para Concreto Asfáltico y Otros Tipos de Plantas de Mezclas" (SS-1).

6.3.5.3.3 Mezclas de emulsiones asfálticas para bases.

6.3.5.3.3.1 Requisitos de Materiales para Mezclas de Emulsiones Asfálticas.

Las mezclas de emulsiones asfálticas utilizadas para materiales de base en este manual, están caracterizados por tres tipos de mezclas:

Tipo I. Mezclas de emulsiones asfálticas hechas con agregados de graduación densa, procesados.

Tipo II. Mezclas de emulsiones asfálticas hechas con agregados semi procesados, de cantera.

Tipo III. Mezclas de emulsiones asfálticas hechas con arenas o arenas limosas.

Los agregados y emulsiones asfálticas utilizadas en estos tipos de mezclas deberán satisfacer los requerimientos expresados en el Capítulo VII, "Manual Básico de Emulsiones Asfálticas" (MS-19), Instituto del Asfalto. El diseño de mezclas de emulsiones asfálticas deberá ser realizado utilizando los procedimientos y criterios incluidos en MS-19. Las propiedades de los materiales típicas de estas tres mezclas fueron utilizadas para desarrollar el espesor de diseño de las curvas para las secciones de pavimento asfáltico emulsificado incluidas en este manual.

Se requiere mezcla en planta para las emulsiones asfálticas Tipo I, de alta calidad y graduación densa, esto con el objeto de obtener los controles necesarios para una mezcla uniforme de los agregados, emulsiones asfálticas y, en algunos casos, del agua durante el proceso de mezclado. Para producir las mezclas de emulsiones asfálticas tipo II o Tipo III. Se puede emplear el proceso de mezclado en planta o en el sitio de trabajo.

6.3.5.3.3.2 Requisitos de Compactación para Mezclas de Emulsiones Asfálticas.

No hay un procedimiento estándar para determinar la densidad de campo de las mezclas de emulsión asfáltica. El Instituto del Asfalto recomienda que el siguiente procedimiento sea empleado mientras se adopte un procedimiento normalizado:

Divida la producción de mezcla de emulsión asfáltica en lotes, cada lote igual a la mezcla producida durante un día. Determine la densidad final para cada lote midiendo la densidad promedio de seis especímenes de laboratorio, representando dos submuestras elegidas aleatoriamente tomadas de los camiones que llevan las muestras al sitio de trabajo. Los procedimientos de compactación de laboratorio recomendados se dan en el "Manual Básico de Emulsiones Asfálticas" (MS-19), Instituto del Asfalto. La densidad final deberá ser reportada como densidad seca.

Determine la densidad de compactación, en el campo de cinco posiciones localizadas aleatoriamente en cada lote de la mezcla de compactación. La densidad del material compactado fresco puede determinarse utilizando un aparato de densidad nuclear, calibrado apropiadamente, o por medio de otro procedimiento. La determinación de las densidades hechas después del período de curado puede determinarse en mezclas obtenidas de materiales compactados por una técnica de perforación (core-drilling ó Perforación de Testigos).

Todas las densidades compactadas deberán convertirse a densidad seca. Se recomienda que el promedio de las cinco densidades de campo realizadas en cada lote, sea igual o mayor que el 95 por ciento de la densidad promedio de los seis especímenes de laboratorio, y que ninguna determinación individual sea menor que el 92 por ciento.

Información adicional sobre compactación de mezclas de emulsiones asfálticas se encuentra en el "Manual Básico de Emulsiones Asfálticas" (MS-19), Instituto del Asfalto.

6.3.5.4 Bases y subbases granulares.

6.3.5.4.1 Requerimientos para materiales granulares de base y subbase.

Para aquellos casos en que el diseño incorpora bases y subbases granulares se recomienda que éstas satisfagan los requerimientos de la Especificación ASTM D 2940

"Material de Agregado Graduado para Bases o Subbases en Autopistas y Aeropuertos".

Cuando sea apropiado se pueden, emplear los requerimientos dados en la Tabla 6.22.

6.3.5.4.2 Requerimientos de compactación para bases y subbases granulares.

Las bases y subbases granulares deben compactarse a un contenido de humedad óptimo, con una tolerancia del 1.5%, para obtener una densidad mínima del 100% de la densidad máxima de laboratorio determinada usando el método ASTM D 1557, método D (AASHTO T 180 método D).

TABLA 6.22		
REQUERIMIENTOS DE LA CALIDAD PARA AGREGADOS DE BASE Y SUBBASE GRANULARES		
<i>ENSAYO</i>	<i>REQUERIMIENTOS</i>	
	<i>SUBBASE</i>	<i>BASE</i>
CBR, mínimo* , o	20	80
Valor R, mínimo*	55	78
Limite Liquido, máximo, o	25	25
Indice de Plasticidad máximo, ó	6	NP
Equivalente de arena, mínimo	25	35
Pasante tamiz N° 200, máximo	12	7

* La fórmula presente en la sección 6.3.5.2.3 que relaciona el CBR y el valor R con el Módulo de Resiliencia de la subrasante no es aplicable en el caso de bases y subbases granulares.

La carga de compactación y la presión de contacto deben ser las más altas que el material puede soportar, sin causar desplazamientos de la base o sub-base o de la subrasante. A medida que se van colocando capas más fuertes puede aumentarse la carga y la presión para obtener la densidad final. Un mínimo de 3 densidades de campo deben obtenerse por cada 3,000 toneladas de material.

6.3.6 Procedimiento de diseño estructural.

En este apartado se presentan los procedimientos para la determinación de los espesores de las capas de pavimento consistentes de capas de concreto asfáltico de superficie, con mezcla asfáltica de superficie con emulsión asfáltica (con tratamiento superficial), concreto asfáltico de base, mezcla asfáltica de base con emulsión asfáltica y bases o subbases granulares.

Como ya se explicó en párrafos anteriores (sección 6.3.3 Principios de Diseño), los espesores resultantes satisfacen 2 criterios de deformación unitaria: - La de compresión vertical en la parte superior de la subrasante y - La de tensión horizontal en el fondo de la capa asfáltica más profunda. Los espesores de diseño presentados en las gráficas de diseño A-1 a A-36 (Anexos), para el Sistema de Unidades Internacionales (SI) y para el Sistema de Unidades Norteamericanas (US), representan el espesor mayor obtenido para satisfacer ambos criterios.

Los pasos involucrados en el diseño estructural son los siguientes:

- **Paso 1:** seleccione o determine los datos de entrada:

a) Tráfico, ESAL

b) Módulo de Resiliencia de la Subrasante de Diseño, M_R

c) Tipos de materiales para las capas base y de superficie.

- **Paso 2:** Determine los espesores de diseño usando los datos específicos de entrada.

- **Paso 3:** Diseñe los pavimentos para la construcción en etapas, de ser apropiado.

- **Paso 4:** Realice un análisis económico de las varias alternativas de diseño.

- **Paso 5:** Seleccione el diseño final.

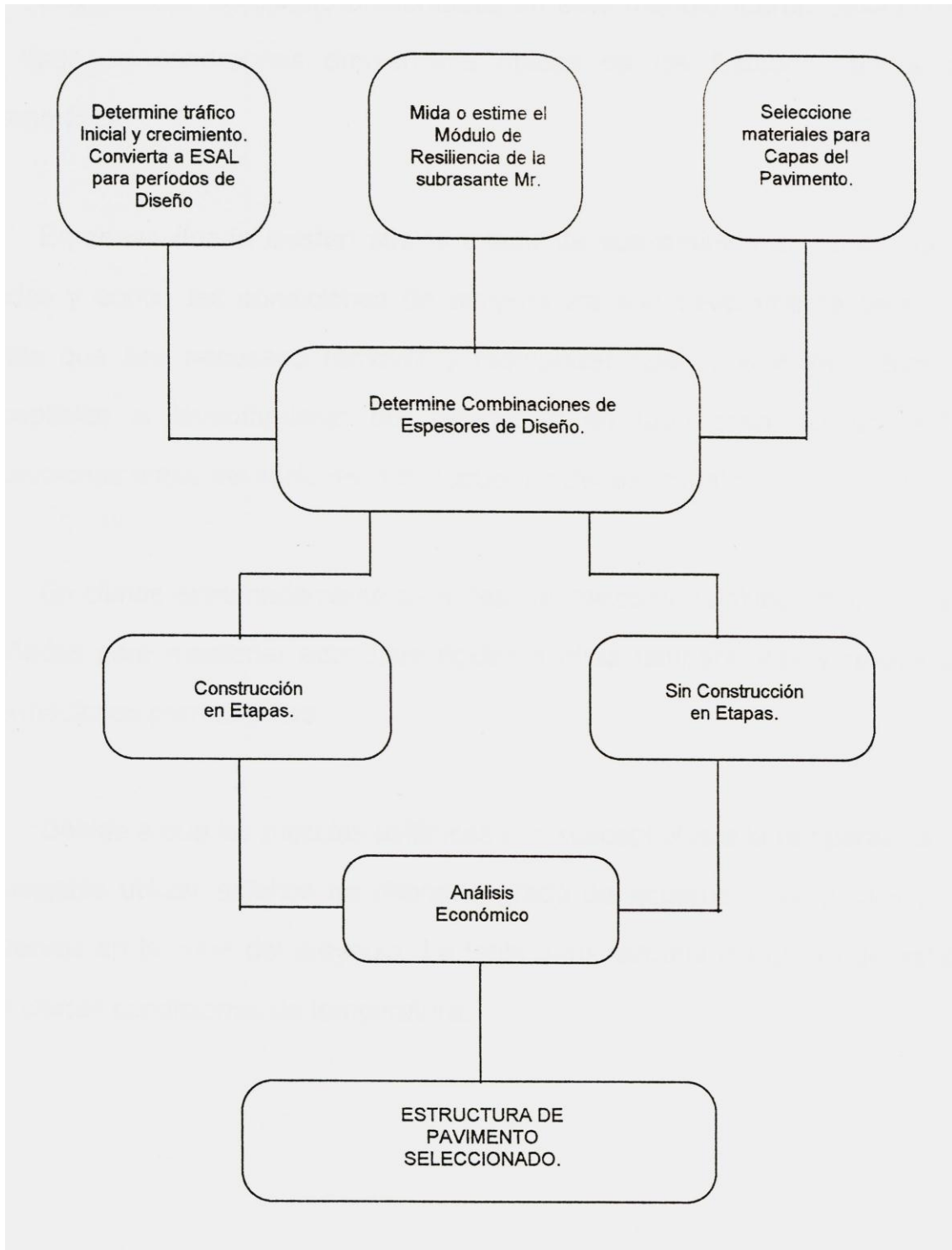
6.3.6.1 Datos de entrada para el diseño: tráfico, subrasante y materiales.

Los insumos comunes para el diseño de cualquier tipo de pavimento asfáltico son:

- Determinación del tráfico expresado en términos del "número de repeticiones de carga equivalente de un eje simple de carga estándar de 18,000 Lb. (80 KN)" esperado en el período de diseño considerado.
- Módulo de Resiliencia de diseño de la subrasante, M_R .
- Tipos de bases asfálticas a considerar: concreto asfáltico, mezcla con emulsiones asfálticas tipo I, II ó III, o base o sub-base granular.

En la Figura 6.21 se muestra un flujograma con los procedimientos antes mencionados.

FIGURA 6.21
FLUJOGRAMA DE DISEÑO



6.3.6.2 Factores ambientales.

Las gráficas de diseño presentadas en este manual fueron basadas en tres tipos de condiciones ambientales típicas de los Estados Unidos de Norteamérica.

En zonas donde existen suelos altamente susceptibles al fenómeno de heladas y donde las condiciones de temperatura son severamente bajas, es posible que sea necesario remover y reemplazar tales suelos por otros no susceptibles al levantamiento por heladas o en todo caso, tomar ciertas precauciones antes del inicio de la construcción del pavimento.

En climas extremadamente calientes, las mezclas asfálticas deberían ser diseñadas para mantener adecuada rigidez a altas temperaturas y resistir las deformaciones permanentes. Debido a que las mezclas asfálticas son susceptibles a la temperatura, es aconsejable utilizar asfaltos de diferente grado de acuerdo a las condiciones existentes en la zona del proyecto. La Tabla 6.23 recomienda grado de asfalto para ciertas condiciones de temperatura.

TABLA 6.23		
CRITERIOS DE SELECCION DEL GRADO DE ASFALTO		
<i>Condición de temperatura</i>	<i>Grado de asfalto</i>	
Frío, temperatura promedio anual < o igual 7 °C	AC-5 AR-2000 Pen 120/150	AC-10 AR-4000 Pen 85/100
Templado, temperatura promedio entre 7 °C y 24 °C	AC-10 AR-400 Pen 85/100	AC-20 AR-8000 Pen 60/70
Cálido, temperatura promedio anual > 24 °C	AC-20 AR-8000 Pen 60/70	AC-40 AR-16000 Pen 40/50

6.3.6.3 Espesores mínimos de concreto asfáltico.

Las gráficas de diseño del presente manual fueron preparadas considerando capas de concreto asfáltico de superficie y base que cumplen con los requerimientos de las mezclas con emulsiones asfálticas que adoptan los requerimientos estipulados en el ítem 6.3.6.3.3

Cuando una capa de concreto asfáltico es colocada encima de una mezcla de base con emulsión asfáltica de tipo II ó III la Tabla 6.24 muestra los espesores mínimos de concreto asfáltico recomendados. Sustituciones por mezclas con emulsiones asfálticas tipo I, pueden efectuarse según lo indicado en ésta tabla. Cuando la mezcla tipo I es empleada como una capa de base se debe considerar un tratamiento superficial en su superficie.

TABLA 6.24		
ESPEORES MINIMOS DE CONCRETO ASFALTICO SOBRE BASES CON EMULSIONES ASFÁLTICAS		
<i>Tráfico de diseño (ESAL)</i>	<i>Tipos II y III¹</i>	
	<i>Milímetros</i>	<i>Pulgadas</i>
10 ⁴	50	2
10 ⁵	50	2
10 ⁶	75	3
10 ⁷	100	4
> 10 ⁷	130	5

¹ Sobre mezclas de base con emulsiones asfálticas tipo II y III puede emplearse concreto asfáltico o mezcla con emulsión asfáltica tipo I con un tratamiento bituminoso.

6.3.6.3.1 Determinación de espesores de pavimentos: todo concreto asfáltico (full-depth)

La selección del espesor de un pavimento todo concreto asfáltico puede hacerse empleando las gráficas de diseño A-1, A-7 ó A-13 de los Anexos, para el Sistema de Unidades internacionales o las gráficas A-19, A-20, A-25 ó A-31 para el Sistema de Unidades Americanas. Hay que entrar con los valores apropiados del Tráfico de Diseño (ESAL) y el valor de M_R de la subrasante para el clima predeterminado.

El espesor del pavimento todo concreto asfáltico puede leerse directamente con una precisión de 25 mm ó menos.

6.3.6.3.1.1 Ejemplo:

Diseñar un pavimento todo concreto asfáltico para las siguientes condiciones:

- Subrasante: $M_R = 41.4 \text{ Mpa (6000 psi)}$

-Tráfico : $ESAL = 10^6$

- Clima : $MAAT = 15.6 \text{ °C (60°F)}$

De la gráfica A-7 (ó A-25) se determina que el pavimento todo concreto asfáltico es de un espesor de 240 mm (9.5") de concreto asfáltico de superficie y base.

6.3.6.3.2 Determinación de espesores de pavimentos con base granular.

Las gráficas de diseño A-5, A-6, A-11, A-12, A-18, A-23, A-24, A-29, A-30, A-35 y A-36, fueron desarrolladas para diseñar pavimentos usando concreto asfáltico sobre bases granulares (Tabla 6.22).

Como quiera que sea, un espesor mínimo de 150 mm del material de mejor calidad para base granular debería ser colocado encima del material de sub-base granular de calidad inferior. El presente documento incluye gráficas de diseño para 150 y 300 mm de espesor de material de base granular.

Los espesores de concreto asfáltico requeridos sobre el espesor de base granular se leen directamente de las gráficas de diseño. Los espesores mínimos de concreto asfáltico están relacionados con el nivel del tráfico ESAL según se indica en la Tabla 6.25. Los espesores mínimos de concreto asfáltico recomendados no deben extrapolarse a niveles de mayor tráfico en las cartas de diseño.

En zonas muy frías se emplean mayores espesores de base granular con el propósito de minimizar el potencial de daños por fenómenos de heladas en el pavimento.

Sí bien espesores mayores a 300 mm han sido empleados para tal propósito, los estudios de análisis de pavimentos muestran que la adición a éstos espesores en poco o nada, benefician el comportamiento estructural del pavimento. En tal sentido es recomendado que se comparen dos diseños, uno basado en comportamiento ante heladas y otro para deterioro estructural, debiéndose definir la estructura final sobre la base del juicio del ingeniero o de experiencias adquiridas. La práctica de reducir los espesores de concreto asfáltico para incrementar seriamente el espesor de base granular, no es recomendada por el Instituto Americano del Asfalto y otros diseñadores de pavimentos debido a que se incrementaría el potencial de otros problemas en el pavimento.

6.3.6.3.2.1 Ejemplo:

Diseñar un pavimento usando base granular para las condiciones siguientes:

- Subrasante: $M_R = 34.5 \text{ Mpa (5000 psi)}$

-Tráfico: $\text{ESAL} = 10^5$

- Clima: $\text{MAAT} = 15.6 \text{ }^\circ\text{C (60 }^\circ\text{F)}$

Prepare dos diseños: uno para una base de 150 mm. (6") y otro para una base de 300 mm. (12").

Los diseños alternativos son:

140mm (5.5 pulg.) concreto asfáltico

150mm (6.0 pulg.) base granular

290mm (11.5 pulg.) espesor total

- 100mm (4.0 pulg.) carpeta asfáltica
- 150mm (6.0 pulg.) base granular
- 150mm (6.0 pulg.) sub-base granular
- 400mm (16.0 pulg.) espesor total

TABLA 6.25		
ESPESOR MINIMO DE CONCRETO ASFALTICO SOBRE BASE GRANULAR		
<i>Tráfico (ESAL)</i>	<i>Condición de tráfico</i>	<i>Espesor mínimo de concreto asfáltico</i>
10 ⁴ ó menos	- Zonas de parqueo y caminos rurales de bajo volumen	75 mm (3.0 pulg)*
Entre 10 ⁴ y 10 ⁶	- Tráfico mediano de vehículos pesados	100 mm (4.0 pulg)
10 ⁶ ó más	- Tráfico alto de vehículos	125 mm (5.0 pulg)

* Para pavimentos todo concreto asfáltico o pavimentos de mezclas con emulsión asfáltica, el espesor es de 100 mm (4 pulg) en esta categoría de tráfico, tal cual se indica en las gráficas de diseño.

6.3.6.3.3 Determinación del espesor para pavimento con mezclas de asfalto emulsificado sobre base de agregados no tratados.

Gráficas de diseño para el diseño de espesores de pavimento con mezclas de asfalto emulsificado usadas para toda o parte de la mezcla de asfalto requerido sobre bases de agregados no tratados no han sido preparadas. Este método es recomendado:

1. Diseñar un pavimento todo concreto asfáltico (espesor T_A) para las condiciones apropiadas de clima, tráfico y subrasante. Asumir un espesor de superficie de 50 mm

(2 pulg.) y calcular el espesor de base correspondiente como $(T_A - 2)$.

2. Diseñar un pavimento para las mismas condiciones climáticas, de tráfico y subrasante usando el tipo de mezcla de asfalto emulsificado seleccionado (espesor = T_E). Asumir un espesor de superficie de 50 mm (2 pulg) y calcular el espesor de base como $(T_E - 2)$.

3. Diseñar un pavimento para las mismas condiciones usando concreto asfáltico y el espesor deseado de la base de agregado no tratado (espesor AC = T_u).

4. Seleccionar la porción del espesor de concreto asfáltico obtenido en el paso (3) que es para ser reemplazado por la mezcla de asfalto emulsificado ($T_u - AC_{min}$).

Nota: Mantener el espesor mínimo de concreto asfáltico de la tabla 6.24

5. Multiplicar éste espesor por la relación del paso (2) al paso (1) para obtener el espesor de la base de asfalto emulsificado (T_{EB}). Esta ecuación cuantifica los valores determinados en los pasos del (1) al (5).

$$T_{EB} = (T_u - AC_{min}) \times \frac{(T_E - 2)}{(T_A - 2)}$$

Donde:

T_{EB} = Espesor de la base de asfalto emulsificado (paso 5).

T_u = Espesor de concreto asfáltico usando el diseño de base de agregado no tratado (paso 3).

AC_{min} = Espesor mínimo de concreto asfáltico (paso 4).

$T_E - 2$ = Espesor de la base usando el diseño de base de asfalto emulsificado (paso 2).

$T_A - 2$ = Espesor de la base usando el diseño de todo concreto asfáltico (paso 1).

6.3.6.3.3.1 Ejemplo:

Diseñar un pavimento con superficie de concreto asfáltico de mezcla de asfalto emulsificado tipo III, y una base de agregado no tratado de 150 mm. (6 pulg.), localizado en una región climática con MAAT = 15.6 °C (60 °F) MT de la subrasante = 55.2 Mpa (8000 psi) y un ESAL = 10^5 .

1. Del gráfico de diseño A-7 (A-25):

Todo concreto asfáltico: $T_A = 150$ mm (6 pulg.).

Superficie AC = 50 mm (2 pulg.), asumida.

Por lo tanto, base de AC = $T_A - 50$ mm (2 pulg) = 100 mm (4 pulg).

2. Del gráfico de diseño A-10 (A-28):

Espesor de la superficie asfáltica y base tipo III =

$T_E = 215$ mm. (8 pulg)

Superficie AC = 50 mm (2 pulg), asumido

Por lo tanto, base de asfalto emulsificado = $T_E - 50$ mm (2 pulg) = 165 mm. (6.5 pulg).

3. Del gráfico de diseño A-11 (A-29):

Espesor de superficie de asfalto y base sobre base de agregado no tratado =

$T_u = 100$ mm. (4 pulg).

4. De la Tabla 6.25 $AC_{mim} = 50$ mm (2 pulg) para ESAL = 10^5

Por lo tanto, reemplazar la base de concreto asfáltico restante

[$Tu - AC_{min} = 100 \text{ mm} - 50 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$ (4 pulg - 2 pulg = 2 pulg)] con base de asfalto emulsificado.

5. Obtener el espesor de la base de asfalto emulsificado:

$50 \text{ mm} \times 1.65 = 82,5 \text{ mm}$ (usar 85 mm) ó

$2.0 \text{ pulg.} \times 1.65 = 3.3 \text{ pulg}$ (usar 3.5 pulg)

El diseño final es:

50 mm (2 pulg.) concreto asfáltico

85 mm (3.5 pulg.) mezcla asfáltica emulsificada tipo III

150 mm (6 pulg) base de agregado no tratado

285 mm (11.5 pulg) espesor total.

6.3.6.4 Construcción en etapas

La construcción en etapas es la construcción de caminos y calles aplicando capas sucesivas de concreto asfáltico de acuerdo a un diseño y tiempos preestablecidos.

No debe confundirse la construcción en etapas con el mantenimiento periódico o rehabilitación de pavimentos existentes. El procedimiento, tal cual se aplica en éste documento, presupone que la segunda etapa será construida antes de la primera etapa de muestras considerables de daños. El procedimiento ya ha sido aplicado en la evaluación de pavimentos para el diseño de capas de refuerzo, pero no es usado para ese propósito en este documento.

6.3.6.4.1 Ventajas de la construcción en etapas.

La construcción en etapas es ventajosa en las siguientes situaciones:

- a)** Cuando no existen fondos suficientes para construir el espesor de diseño final (20 años por ejemplo), el pavimento puede construirse en dos etapas, con la primera etapa diseñada para un período más corto. Por supuesto, es importante asegurarse que habrá disponibilidad de fondos para la segunda etapa en su oportunidad.
- b)** Las dificultades en estimar el tráfico para períodos de 20 ó 25 años, especialmente para calles y caminos rurales de bajo volumen de tráfico, hacen que la construcción en etapas sea particularmente atractiva. Un camino puede diseñarse para un período de diseño menor (es decir, menor efecto del tráfico) y pueden realizarse conteo de tráfico, una vez ha sido habilitada, mejorando de ésta manera, los estimados de tráfico futuro.
- c)** Estudios realizados en las secciones experimentales AASHTO indicaron los pavimentos que fueron reforzados, después de someterse al tráfico, brindaron un mejor comportamiento en servicio, que aquellos pavimentos nuevos diseñados sin considerar el refuerzo en el período de diseño.
- d)** Las zonas débiles que se desarrollan durante la primera etapa pueden ser reparados, así mismo las proyecciones de tráfico pueden ser modificados una vez que se conozcan datos más precisos por medio de una cuidadosa evaluación de la condición del pavimento hacia el final de la primera etapa, es posible ahorrar en el espesor final del pavimento o extender la vida del pavimento original.

6.3.6.4.2 Método de diseño.

El método de diseño recomendado involucra tres pasos:

- 1) Diseño de la primera etapa:
- 2) Diseño preliminar del refuerzo para la segunda etapa:
- 3) Diseño final del refuerzo para la segunda etapa.

El método de diseño de la primera etapa se basa en el concepto de "Vida Remanente". Bajo este concepto, la primera etapa es diseñada para un período de diseño menor que aquella que produciría la falla por fatiga. Estudios han mostrado que un período de diseño de la primera etapa equivalente a un 60% del período de diseño que representa un sólo período de diseño, produciría un espesor económicamente aceptable para el diseño de la primera etapa. Para emplear este concepto, el ESAL para el período de diseño de esta primera etapa debe de ajustarse para proveer la vida remanente del 40% (100-60) al final de la primera etapa de diseño. Esto se efectúa así:

Tráfico ajustado para el período de diseño de la primera etapa

$$\text{Tráfico}_1 = 100/60 * \text{ESAL} = 1.67 * \text{ESAL}_1$$

6.3.6.4.2.1 Ejemplo:

Asúmase que un pavimento todo concreto asfáltico que será diseñado en una región climática con un MAAT = 15.6 °C (60 °F), con un módulo de Resiliencia de la subrasante $M_R = 51.5 \text{ Mpa}$ (7,500 psi), el tráfico anticipado durante los primeros 5 años de 200,000 aplicaciones de ESAL y durante 15 años subsiguientes 1.8×10^6 aplicaciones de ESAL. Prepárese un diseño para una primera etapa de 5 años.

El tráfico ajustado para la primera etapa es $\text{TRAFICO}_1 = 1.67 * 200,000 = 334,000$

De la gráfica A-7 (A-25) el espesor de concreto asfáltico para la primera etapa es $h_1 = 190\text{mm}$ (7.5 pulg.)

El diseño preliminar del esfuerzo para la segunda etapa es seleccionado basado en los conceptos de vida remanente. La idea es estimar, al momento de preparar el diseño original, un espesor de refuerzo, que asegure que la estructura final del pavimento pueda durar el período de diseño completo (suma de los períodos de diseño de la primera y segunda etapa). Esto es efectuado primeramente estimando el tráfico $ESAL_2$ para el período de diseño de la segunda etapa, de tal modo que se pueda determinar la vida remanente que provee el diseño de la primera etapa. En este procedimiento la vida remanente es $100 - 60 = 40 \%$.

Tráfico preliminar ajustado para el período de diseño de la segunda etapa

$$\text{TRAFICO}_2 = [100 / 40] * ESAL_2 = 2.5 * ESAL_2$$

6.3.6.4.2.2 Ejemplo:

Empleando la información indicada en el ejemplo anterior:

El tráfico preliminar ajustado para la segunda etapa es:

$$\text{Tráfico}_1 = 2.5 * 1,800,000 = 4,500,000$$

El espesor de pavimento para esta segunda etapa es seleccionado:

- a) Estimar el espesor requerido h_2 del nuevo pavimento para el $ESAL_2$ ajustado.
- b) Obtener el espesor de esfuerzo preliminar para la segunda etapa $h_s = h_2 - h_1$

Para este ejemplo:

$$h_2 = 305 \text{ (120 pulg) de la gráfica A-1(A-19)}$$

$$h_2 = 305 - 190 = 115 \text{mm} \quad (120 - 75 = 4.5 \text{ pulg})$$

El concepto de vida remanente de la construcción en etapas está basado en la asunción que la segunda etapa será colocada antes que el diseño de la primera etapa presente serios síntomas de deterioro y puede ser utilizado para análisis económicos que impliquen futuros desembolsos. Como quiera que sea por la naturaleza errática del comportamiento de los pavimentos, el pavimento puede encontrarse en la mejor o peor condición al finalizar el período de diseño de la primera etapa. Por esta razón el procedimiento para desarrollar el diseño final de la segunda etapa puede ser diferente. A continuación se recomienda el procedimiento a seguir:

Paso 1 Un año antes del término del período de diseño de la primera etapa, efectuar un inventario de condición del proyecto construido en esta primera etapa. Los procedimientos para evaluar la condición del pavimento son discutidos en el manual MS-17 del Instituto del Asfalto, "Capas Sobrepuestas de Asfalto para Rehabilitación de Autopistas y Calles", Capítulo II.

Paso 2 Si el pavimento aparenta estar en excelentes o buenas condiciones (por ejemplo un PSI aproximado de 3.5 con pocos daños), programar inventarios de condiciones adicionales el próximo año.

Paso 3 Cuando el pavimento aparenta llegar a una condición de inicio de deterioro, pero se mantiene en una buena condición de acuerdo a los procedimientos indicados en el manual MS-17, entonces, aplicar el espesor de refuerzo según el diseño preliminar de la segunda etapa o aplicar un nuevo refuerzo, diseñado con cualquiera de los procedimientos indicados en el manual MS-17.

Paso 1 En los ejemplos indicados anteriormente, un inventario de condición fue efectuado en el cuarto año y en cada año sucesivo. Al sexto año el PSI bajó a 2.5 y la construcción en etapas es inmediatamente programada.

Paso 2 El ESAL para el período de diseño de la segunda etapa de 14 años es ahora estimado en 1.9×10^6 .

Paso 3 Las medidas de deflexiones indican un RRD de 1.27mm (0.050 pulg). (RRD indica las deformaciones existentes en el pavimento)

Paso 4 El espesor de refuerzo para la segunda etapa fue determinada en 75mm (3 pulg) y fue adoptado en lugar del espesor de refuerzo preliminar de 115mm (4.5 pulg).

CAPITULO VII

“PROCESO

CONSTRUCTIVO”

7.0 PROCESO CONSTRUCTIVO

7.1 INTRODUCCION

En los capítulos anteriores se trataron aspectos sobre los métodos y procedimientos que se utilizan con frecuencia en la determinación de las opciones disponibles para rehabilitar pavimentos deteriorados, y sobre la viabilidad de cualquier alternativa de reciclaje. A continuación se presenta el desarrollo del proceso constructivo tomando como base lo establecido en el manual de reciclaje de wirtgen y en los manuales del Instituto del asfalto acomodándolo a un proyectos ejecutados en nuestro país, para que al final tener claro lo que es el proceso de reciclado en frío y en caliente .

7.2 GENERALIDADES⁴⁹

Dentro de los métodos y procedimientos que se utilizan con frecuencia en la determinación de las opciones disponibles para rehabilitar pavimentos deteriorados, y sobre la viabilidad de cualquier alternativa de reciclaje. Cuando el reciclaje surge como la opción preferida, el siguiente reto es llevar a cabo el trabajo. En este capítulo se trata de manera más detallada la operación real del reciclaje, enfocándose en algunos de los aspectos más importantes que hacen un proyecto exitoso.

Desde la perspectiva de la construcción, los procedimientos de diseño proveen una definición clara de los dos requisitos más importantes para el reciclaje:

- Las especificaciones de calidad de los materiales en la totalidad de la capa reciclada; y
- El espesor de la capa reciclada.

⁴⁹ Extraído del manual de reciclaje Wirtgen, 2^{da} Edición, Septiembre 2001

Evidentemente, el desempeño del pavimento rehabilitado depende del cumplimiento de estos dos requisitos básicos; ellos representan suposiciones fundamentales que se hacen para predecir la vida del pavimento rehabilitado, y cualquier omisión o error en éstas puede dar como resultado una falla prematura.

Debido a la inmediatez de este tipo de trabajos, los proyectos de reciclaje necesitan un manejo apropiado. Las máquinas modernas de reciclaje tienen un gran potencial en cuanto a su rendimiento, por lo que no es extraño que una sola máquina realice un kilómetro completo de vía rehabilitada en un día, aunque para efectos de planeación se utiliza normalmente un estimativo más conservador de 5000 m². Para obtener el máximo beneficio de este potencial, las operaciones de reciclaje deben manejarse con cuidado para asegurar que lo que se obtiene cumpla con los requerimientos especificados, supervisando que:

- Todos los aspectos del trabajo se analicen en detalle y se planeen meticulosamente;
- Los obstáculos al tren de reciclaje se identifiquen y remuevan a tiempo;
- La demanda de materiales (como los agentes estabilizadores) se satisfaga continuamente, y que éstos estén disponibles en el sitio de la obra a tiempo;
- La disponibilidad de la maquinaria esté garantizada mediante programas apropiados de mantenimiento preventivo;
- Los operarios y los supervisores estén entrenados adecuadamente y entiendan con claridad las diferentes facetas de la operación de reciclaje; y
- Los asuntos de seguridad industrial reciban la atención que se merecen, particularmente cuando se trabaja en caliente con agentes estabilizadores bituminosos.

En las secciones siguientes se profundiza en estos aspectos y se enfatiza en los temas vitales para crear un ambiente laboral productivo en las operaciones de reciclaje.

Acomodación del tráfico. El tráfico que utiliza la vía existente, su composición en términos de vehículos livianos y pesados, y la cantidad que pasará mientras se recicla, a menudo determinan cómo se va a ejecutar el trabajo. Generalmente se prescriben limitaciones en las horas de trabajo, así como también las necesidades para el acceso temporal de las personas a sus propiedades.

7.3 RECICLAJE EN FRIO

Se hace énfasis en todos los aspectos más importantes referentes al proceso de reciclaje en frío, tomándose como base lo establecido en el “manual de reciclaje en frío” del grupo Wirtgen y los manuales del Instituto del asfalto referentes al reciclado de pavimentos a parte de ello la información se ha enriquecido con imágenes de proyectos que el Ministerio de Obras Públicas (MOP) ha realizado en nuestro país, como lo es la carretera Acajutla–La Libertad.

7.3.1 Planeación para el reciclaje

El éxito en el desarrollo de un proyecto de reciclaje, como en todas las operaciones de alto volumen y gran complejidad, depende de la calidad en la planeación. Antes de comenzar los trabajos, hay que analizar con cuidado cada uno de los pasos y operaciones que deben ejecutarse y, diariamente, o para cada turno, pasar este proceso al papel en forma de un plan de producción.

En general el proceso de reciclaje en frío consta de los siguientes aspectos en su proceso Constructivo.

7.3.1.1 Tipo de máquina recicladora.

En la planeación para la ejecución del reciclaje se debe tomar en cuenta hasta el más mínimo detalle para conformar el tren de reciclaje ya que aparte de que estén la obra y con personal que conozca su forma de operar, estas deben estar en óptimas condiciones.

7.3.1.1.1 Recicladoras

En la actualidad hay una lista bastante grande de máquinas de reciclado tanto americanas como europeas y todas dicen ser las mejores y con mayores ventajas tales como Wirtgen, CMI, Caterpillar etc., sin embargo, en México y en Latinoamérica en general, hay preferencia por las marcas Wirtgen 2100 DCR o 1000 CR y Caterpillar ya sea la R-250. R-350 y la RM-350. Esta preferencia está basada en la experiencia que se tiene en la construcción de caminos con esta maquinaria, que tiene un servicio de refacciones en cada ciudad importante de cada país.

El constructor prefiere tener una maquinaria igual o parecida a cualquier otra en el mercado, pero que tenga la garantía de tener refacciones cuando se requieran localmente o en 48 horas vía aérea, lo que representa anualmente un ahorro muy importante en tiempos perdidos. También cuenta el hecho que las empresas tienen un patrimonio técnico que está basado en su personal que conoce las máquinas Wirtgen o Caterpillar.

No se descarta ninguna marca puesto que hay que darles el crédito que son buenas máquinas pero no hay una dinámica en lo que se refiere a las refacciones y servicio.⁵⁰

El elemento fundamental de estos equipos es un rotor (Fig.1) provisto de picas o de paletas que realiza la disgregación del suelo o del firme y efectúa el mezclado de los elementos con el cemento y el agua.

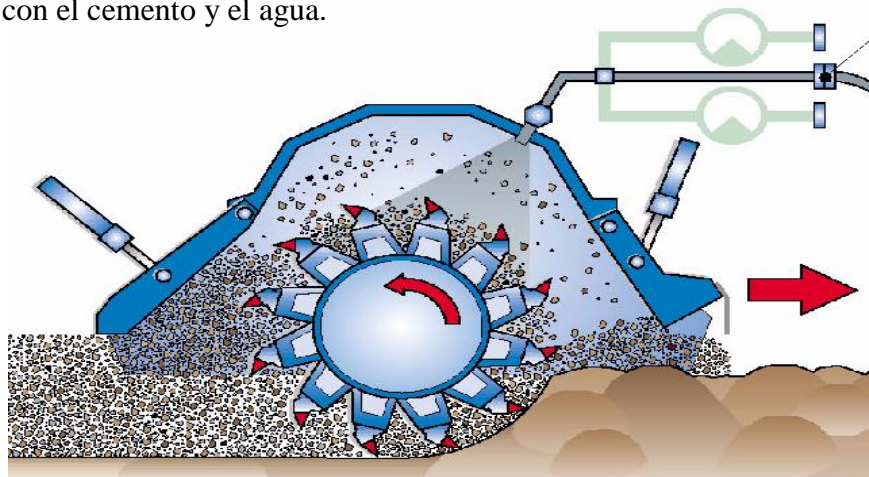
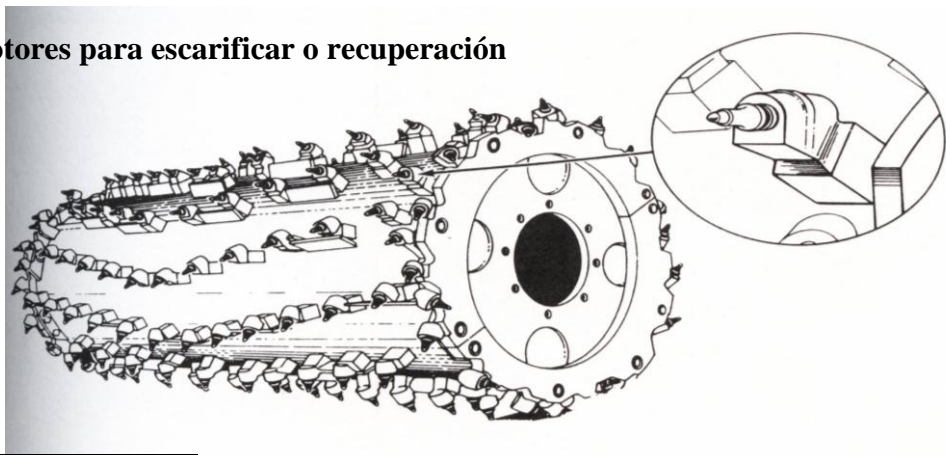


Figura 7.1: Esquema del funcionamiento del rotor de una recicladora

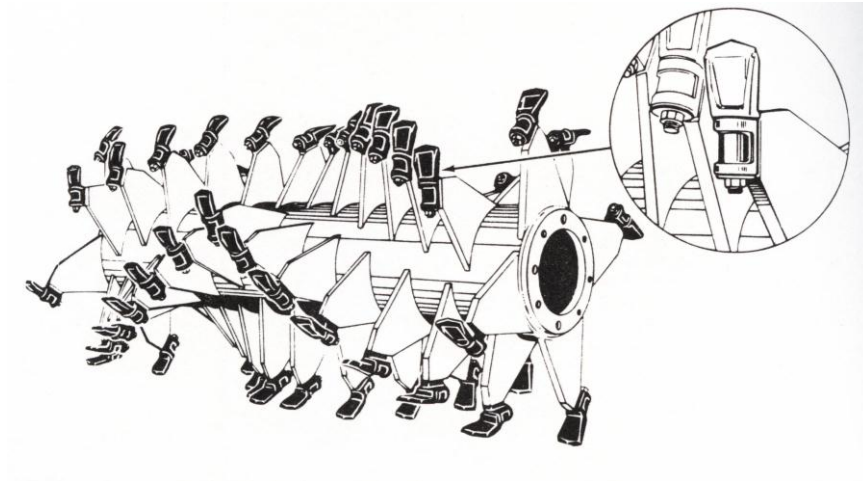
Los equipos de concepción más sencilla son por tanto aquellos en los que la mezcla así formada no sufre ningún otro proceso hasta su paso por los rodillos, excepto la creación de juntas en fresco en el caso de firmes reciclados.

Fig. 7.2 a) Rotores para escarificar o recuperación



⁵⁰ Extraído de “Reciclado de pavimentos en frío empleando emulsiones asfálticas cationicas”

Fig. 7.2 b) Rotores para estabilizar



Los rotores de fresado empleados para reciclar firmes (fig. 7a) llevan montadas unas picas con punta de widia, mientras que los utilizados para estabilizaciones (fig. 7b) suelen estar provistos de unas puntas trituradoras rectas o en forma de L. en un número dos ó tres veces inferior al de picas. En algunos modelos se ofrecen hasta 10 tipos diferentes de rotores. Por el contrario, en otros casos se emplea un mismo rotor con puntas de widia tanto para estabilizar explanadas como para reciclar firmes. Las picas y paletas se disponen helicoidalmente en el rotor, a fin de asegurar una mayor homogeneidad tanto en la disgregación como en el mezclado.

Dentro de las estabilizadoras y recicladoras, y dejando aparte los rotoarados y otros equipos de origen agrícola y baja potencia, que solamente deben emplearse en obras de escasa importancia, se pueden distinguir los siguientes tipos:

1. Equipos que pueden utilizarse indistintamente tanto para la estabilización de suelos como para el reciclado, generalmente sin más que modificarle el rotor. Este último se

encuentra alojado dentro de una carcasa protectora, situada generalmente en la parte central del equipo. La mezcla obtenida después de disgregar la explanada o el firme existente y de mezclar el material resultante con el agua y el cemento sale por una compuerta regulable situada en la parte trasera de la carcasa. Esta última va provista de una barra regadora con una serie de toberas para la inyección de agua o de lechada de cemento y agua. El giro del mismo se realiza de forma que los materiales arrancados son lanzados hacia la parte delantera de la carcasa.

Se dispone de una amplia gama de equipos, con potencias que van desde 300 HP hasta 1200 HP, anchos de trabajo oscilando entre 2 m y 3,8 m y profundidades de reciclado próximas en algunos casos a los 40 cm. Este último valor puede ascender a 50 cm en estabilizaciones. Algunas características adicionales que pueden tener estos equipos son las siguientes:

- Barra rompedora de elementos fresados incorporada a la carcasa, cuya distancia al rotor puede regularse para limitar el tamaño máximo de los elementos amasados por este último
- Carcasa de altura regulable, dejando más o menos espacio entre la parte superior de la misma y el rotor para así variar el volumen de la "cámara de mezclado" en función de la profundidad de fresado
- Regulación electrónica de la profundidad de fresado
- Posibilidad de inclinar el rodillo con respecto a la horizontal para adaptarse a la pendiente transversal requerida
- Control mediante microprocesador del caudal de agua o lechada añadida

- Control de potencia consumida para ajustar la velocidad de avance de forma que el motor trabaje siempre en las proximidades de su par óptimo.

En el caso de obras de reciclado, estos equipos pueden ser utilizados en general en carreteras de todo tipo de tráfico, incluso si el firme contiene un espesor apreciable de capas de mezcla bituminosa u otros materiales tratados. Como es lógico, dicho espesor depende de la potencia del equipo. Como ejemplo, puede mencionarse que en una obra en España se han reciclado con resultados satisfactorios 30 cm del firme existente, de los que en ocasiones 20 cm correspondían a mezclas bituminosas.

2. Equipos de reciclado derivados de las fresadoras de firmes, pero que a diferencia de estas últimas, además de escarificar el material realizan un mezclado del mismo con cemento y con agua. El rotor se encuentra dentro de una cámara de mezclado situada igualmente en la parte central del equipo. Dicha cámara va provista de un sistema doble de toberas para entrada de líquidos (por ejemplo, agua y emulsión, si se realiza un reciclado mixto cemento - emulsión). El material mezclado sale de la cámara en forma de cordón. En la parte trasera de la máquina, un sinfín ajustable en altura lo distribuye delante de una regla vibrante extensible que realiza una precompactación del material. Los equipos existentes tienen potencias del orden de 600 HP, anchos de fresado de 2 m y profundidades máximas de reciclado de 40 cm.

Estos equipos están dotados igualmente de una serie de controles similares a los ya mencionados para las máquinas que pueden emplearse también para la estabilización de explanadas:

- Regulación electrónica de la profundidad de fresado

- Control mediante microprocesador del caudal de agua o lechada incorporado
 - Regulación de la velocidad de avance en función de la resistencia al mismo encontrada por el equipo (la cual como es lógico, aumenta con la profundidad).
 - Posibilidad de inclinar tanto el rotor como la regla vibrante de precompactación.
3. En los equipos anteriores, el rotor realiza las operaciones de disgregación y de mezcla. Por el contrario, un equipo concebido expresamente para obras de reciclado realiza por separado las operaciones de escarificado del firme y de mezcla con el agua: la primera de ellas, mediante un rotor transversal con picas de widia; y la segunda, con un eje longitudinal dotado de paletas. El material mezclado es distribuido mediante un sinfín situado en la parte trasera de la máquina. El ancho de trabajo es de 2 m, la potencia del motor de 750 HP y puede alcanzar una profundidad máxima de 33 cm⁵¹



Fig. 7.3 a) Recicladora Wirtgen

⁵¹ Basado en “Panorámica de la maquinaria moderna para la ejecución de obras de estabilización y de reciclado in situ con cemento”

Fig. 7.3 b) Recicladora CAT RM-250C



La decisión de usar una Wirgent en un proyecto en particular es importante. El tipo de máquina utilizada afecta la tasa de producción y establece el ancho y la profundidad, máximos de corte que pueden reciclarse por pasada. Con una Wirgent queda eliminada la necesidad de una motoniveladora, debido a la regla montada en la máquina sobre orugas mientras que la motoniveladora si se requiere cuando se utiliza la RC 250, pero el uso de una u otro tipo de maquinaria dependerá de la disponibilidad y necesidad de quien ejecute la obra.

7.3.1.1.2 Compactadores⁵².

Compactadores vibratorios con tambor de acero.

Al compactar un material estabilizado, el objetivo es reducir los huecos llenos de aire y agua, incrementando la densidad y, por lo tanto, la capacidad portante de una capa. Para la compactación de capas estabilizadas, normalmente se emplean Compactadores

⁵² Basado en el manual de reciclaje en frío Wirtgen, 2^{da} Edición, Septiembre 2001

monotambor en combinación con compactadores de neumáticos. Cuando se seleccionen el tipo y el tamaño del compactador, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

Peso/tamaño del compactador	Frecuencia y amplitud
<ul style="list-style-type: none"> - 101 a 151 de masa estática para compactar capas recicladas hasta de 200 mm de espesor. - 151 a 201 de masa estática para compactar capas recicladas entre 200 y 400 mm de espesor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Frecuencia de vibración entre 29 y 35 Hz. - Amplitud de frecuencia entre 0,91 y 1,66 mm. - Amplitud grande/frecuencia baja para la compactación inicial, penetración profunda de energía. - Pequeña amplitud/frecuencia alta para la compactación final, penetración poco profunda de energía.

Fig. 7.4 Rodo Vibratorio



Compactadores de llantas neumáticas

- De 12 a 301 de masa estática;
- De cuatro ruedas mínimo, tanto al frente como en la parte trasera;
- Un traslape mínimo de 50 mm de cada trayectoria de las ruedas; y
- Distribución uniforme de la carga sobre cada llanta.

7.5 Fig. Compactadores de llantas neumáticas



7.3.1.1.3 Niveladoras⁵³.

Éstas deben ser lo suficientemente potentes para esparcir, colocar y nivelar el material reciclado. Las siguientes especificaciones pueden usarse como guía:

- Motor de potencia de 100 Kw.
- Cuchilla de 3,66 m de longitud, con bordes reemplazables.
- Altura de la cuchilla de 610 mm; y
- Controles hidráulicos para una velocidad constante de ubicación de la cuchilla.



Figura 7.6 Motoniveladoras

⁵³ Ibidem.

7.3.1.1.4 Distribuidores de conglomerantes⁵⁴

Carrotanques de agua

La mayor parte de las operaciones de reciclaje, que incluyen agentes estabilizadores, necesitan la adición de agua para alcanzar el contenido de humedad para la cual se obtiene la compactación requerida. (El agua necesaria para espumar un asfalto es diferente del agua que normalmente se requiere para la compactación. En el primer caso solamente se usa agua potable.

Pueden emplearse carrotanques de configuraciones muy distintas para el suministro de agua, pero todos deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- La capacidad mínima del tanque varía de acuerdo con la operación particular, pero por lo general la tasa de producción y la demanda de agua son bastante altas. Para evitar costosos tiempos de espera, debe balancearse la capacidad del carrotanque de agua con las necesidades del tren de reciclaje, la profundidad del reciclaje, el contenido de humedad del material in situ y con la distancia a la fuente de agua.

Independientemente del tipo de estabilizador que se use, en muchos de los proyectos se requieren como mínimo dos carrotanques de 10.000 litros para suministrar el agua de compactación; mientras uno se encuentra acoplado al tren, el otro se llena en la fuente adecuada de agua más cercana.

- Bombas para el llenado de agua, de 500 litros/minuto de capacidad mínima.

⁵⁴ Ibidem.

- Las mangueras para suministro varían de acuerdo con la configuración del tren de reciclaje. Usualmente el carrotanque de agua es el primer vehículo del tren y, por tanto, la manguera de suministro de este líquido es la más larga. Para prevenir la interrupción del flujo, el diámetro interno mínimo de todas las mangueras de suministro debe ser de 100 mm. Las mangueras tienen que ser flexibles y no colapsar bajo succión.
- Durante la operación del reciclaje, la alta frecuencia en los cambios de carrotanques de agua demanda que en todas las conexiones se tengan acoples de retiro rápido.

Fig. 7.7 Carrotanques de agua o camiones cisternas



Carrotanques de asfalto

Todos los tipos de agentes estabilizadores asfálticos necesitan carrotanques para alimentar la recicladora, los cuales deben seleccionarse cuidadosamente con el objeto de evitar problemas. A menudo, el transporte de asfalto lo realizan terceros (por ejemplo un transportador subcontratista), quienes pueden tener diferentes tipos de carrotanques, algunos de ellos adecuados para trabajar como parte de un tren de reciclaje y otros no.

Los carrotanques de asfalto deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Ser una unidad sencilla o la combinación de una unidad sencilla montada sobre un remolque con una capacidad mínima del tanque de 10.000 litros, o del doble, preferiblemente. Para proyectos de alta producción, deben considerarse tanques con capacidades superiores a los 20.000 litros,
- No tener escapes, tanto del mismo tanque como de la fontanería de la válvula de salida.
- Contar con una válvula de salida de mínimo 75 mm de diámetro interno cuando se encuentra completamente abierta y fija a la parte posterior del carrotanque, capaz de drenarlo completamente.
- Tener un adaptador "estándar" sobre la tubería de salida para acoplar la tubería de alimentación a la recicladora.
- Instalar bloques de avance y sujetadores de remolque tanto en el frente como en la parte posterior, para permitir que el carrotanque se sitúe en el centro del tren.
- Debe contarse con una barra sumergible calibrada, capaz de medir el contenido del tanque con una precisión de aproximadamente cien litros.

- Poseer un termómetro calibrado para indicar la temperatura del material a un tercio del fondo del tanque.

Cuando se estabiliza con asfalto espumado, pueden aplicarse las siguientes consideraciones adicionales:

- Revestimiento completo para un aislamiento efectivo.
- Un sistema de calentamiento capaz de incrementar la temperatura del contenido del tanque por lo menos 10°C por hora, cuando éste se encuentra por debajo de los 100°C.

Fig. 7.8 Carrotanques de asfalto



7.3.1.2 Geometría de la vía.

El ancho de la vía es primordial, ya que determina el número de pasadas (cortes) requeridas para cubrir totalmente la calzada. Las secciones de anchos variables al principio y al final de carriles en subida requieren atención especial. Además, la forma de la superficie (bombeo o peralte) impone la ubicación de las juntas longitudinales entre cortes adyacentes.

Ejemplificando esta situación para la carretera en estudio:

Longitud: 76.386 Km.

Ancho de carril: 3.65 m, 1 @ sentido.

Ancho total de hombro: 2.35 m

Bombeo necesario: 2%

Durante la ejecución de un proyecto siempre se debe contar con una cuadrilla topográfica, que garantice los niveles y geometría del producto termina, por ejemplo un mal bombeo causara problemas de drenaje y afectara el comportamiento de la vía a parte de su vida útil.

Fig. 7.9 Topografiando el producto terminado



7.3.1.3 Objetivo de producción.

La cantidad de trabajo reciclado durante el período planeado debe ajustarse lógicamente a la vía. Por lo general, el trabajo se programa para completar una sección de la vía, ya sea a lo ancho o sólo en la mitad de éste. Reciclar una porción de la vía no es práctico; por ejemplo, reciclar sólo un corte a lo largo de la línea central en una carretera que requiere tres cortes para completar la mitad de su ancho. Cuando medias calzadas recicladas parcialmente son abiertas al tráfico, se ocasionan problemas en el momento de realizar las juntas, y además se causa confusión a los usuarios, especialmente de noche.

7.3.1.4 Requisitos del producto terminado.

Además del espesor de la capa, los requerimientos precisos en función del producto terminado deben estar claros. Éstos incluyen detalles de los niveles y tolerancias de las formas finales, objetivos de compactación, consideraciones de la textura superficial y manejo de cualquier material sobrante.

7.3.1.5 Material en el pavimento existente.

El tipo de material en el pavimento existente, su consistencia y su contenido de humedad son todos pertinentes. Los cambios en los espesores de los diferentes materiales que forman el pavimento existente (particularmente de las capas asfálticas) podrían tener una influencia significativa en la velocidad de avance de la máquina recicladora. Estas diferencias podrían también requerir cambios en la tasa de aplicación de los agentes estabilizadores, del agua e incluso en los espesores de reciclaje.

7.3.1.6 Comportamiento del material reciclado.

La forma como el material se comporta cuando es reciclado influye en cómo debe extenderse, compactarse y terminarse. Cualquier restricción de tiempo en el extendido y la compactación, que normalmente se presenta cuando se utilizan agentes estabilizadores cementantes, tendrá influencia sobre cómo debe ejecutarse el trabajo.

7.3.1.7 Requisitos de pre-reciclado.

Éstos incluyen:

- Remoción de obstrucciones, como tapas de alcantarillas;
- Instalación de nuevos sumideros o de cualquier otro tipo de drenaje adicional;
- Fresado para alcanzar la textura o el nivel prescrito de la superficie; y
- Transporte y colocación de nuevos materiales sobre la superficie existente de la vía.

7.3.2 Logística⁵⁵

El reciclado en frío es un proceso rápido, que implica tasas de producción elevadas y que las máquinas estén alimentadas continuamente con agentes estabilizadores, agua y agregados importados (donde esto se requiera) para alcanzar este alto rendimiento. Esta situación presenta un reto en la procura de los diferentes materiales, en especial cuando las líneas de suministro son largas o el acceso al sitio es restringido.

⁵⁵ Ibidem

La demanda diaria de todos los requerimientos importados ha de calcularse con anticipación, y programar las órdenes y sus envíos de manera tal que se asegure que el proceso de reciclado estará continuamente alimentado, pues sin los suministros necesarios la producción estará restringida y será imposible alcanzar el potencial completo de rendimiento. Estimar los requerimientos de materiales importados, agentes estabilizadores y agua, requiere proyectar los cálculos con base en los objetivos de la producción diaria, como se demuestra en los siguientes ejemplos.

7.3.2.1 Material importado.

Asuma que una capa uniforme de grava natural, de 50 mm de espesor, se extenderá sobre la superficie existente de la vía antes del reciclaje. La demanda diaria de material importado será:

Cantidad de material a importar		
1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor suelto requerido de la capa de grava natural	50,0	mm
3 Volumen por importar de grava natural suelta $item1 * \frac{item2}{1000}$	250,0	m ³
4 Densidad de la grava extendida sobre la vía	1 800,0	kg/m ³
5 Toneladas de material por importar $item3 * \frac{item4}{1000}$	450,0	t

7.3.2.2 Agentes estabilizadores.

Asuma que las especificaciones del proyecto exigen la adición de 1,5 % de cemento y 3 % de asfalto espumado (en peso). La demanda diaria de agentes estabilizadores es:

1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor de la capa reciclada	250,0	mm
3 Densidad del material reciclado compactado	2 250,0	kg/m ³
Demanda de cemento	1,5	%
4 Adición especificada de cemento		
5 Toneladas de cemento requeridas $\text{item1} * \frac{\text{item 2}}{1000} * \frac{\text{item 3}}{1000} * \frac{\text{item 4}}{100}$	42,2	t
Demanda de asfalto	3,0	%
6 Adición especificada de asfalto espumado		
7 Toneladas de asfalto requeridas $\text{item1} * \frac{\text{item 2}}{1000} * \frac{\text{item 3}}{1000} * \frac{\text{item 6}}{100}$	84,4	t

7.3.2.3 El agua

1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor de la capa reciclada	200,0	mm
3 Densidad del material reciclado compactado	2 250,0	kg/m ³
4 Contenido óptimo de humedad del material reciclado	7,5	%
5 Contenido de humedad promedio en el sitio, antes del reciclaje	4,0	%
6 Agua que hay que adicionar para alcanzar la humedad óptima (<i>item4</i> – <i>item5</i>)	3,5	%
7 Cantidad total de agua requerida (redondeada) $\text{item1} * \frac{\text{item 2}}{1000} * \text{item 3} * \frac{\text{item 6}}{100}$	78 750,0	litros

La demanda de agua calculada en el ejemplo anterior es la necesaria para alcanzar el contenido óptimo de humedad del material reciclado. La cantidad de agua se agrega al material durante el proceso de reciclado por inyección dentro de la cámara de mezclado de la máquina y no se incluye ninguna provisión requerida para aplicar sobre la superficie reciclada con propósitos de terminado o curado. Para esta situación deben realizarse provisiones adicionales.

En grandes proyectos de reciclaje, o donde las líneas de suministro son largas, algunas veces se instalan sistemas de almacenamiento temporal para evitar retrasos en la obra debidos a demora en los suministros. Por lo regular, estas instalaciones han de tener la capacidad de almacenar por lo menos un día de demanda de cada material. Para el cemento generalmente se instalan silos; para productos empacados, contenedores y para los líquidos, tanques. En teoría, estas instalaciones deben llenarse y utilizarse únicamente cuando se presenta escasez, evitando así manejos dobles. En todo caso, en la práctica es preferible incorporar algunos de ellos dentro del sistema para evitar problemas adicionales de logística. Ejemplos de estos problemas son;

- El asfalto caliente ($>160^{\circ}\text{C}$), almacenado en un tanque bien aislado, perderá temperatura a una tasa de aproximadamente 1°C por hora. Éste debe mantenerse caliente si se pretende usarlo en el evento de que no lleguen suministros frescos. Sin embargo, esta práctica es costosa (valor del calentamiento) y perjudicial para el asfalto (su oxidación ocurre cuando se almacena por largos períodos a altas temperaturas).
- No todas las emulsiones asfálticas son estables por largos períodos. El fabricante debe dar instrucciones especiales de almacenamiento de dichas emulsiones para evitar que el

asfalto se separe del agua mientras está almacenado.

- El cemento debe utilizarse máximo tres meses después de su elaboración, ya que éste pierde resistencia con el tiempo. Además, los silos o los contenedores tienen que estar sellados para evitar el ingreso de agua lluvia o para prevenir pérdidas.

Todos estos factores deben considerarse en detalle cuando se planea la logística de un proyecto de reciclaje. Como se describió con anterioridad, los cálculos para determinar la demanda diaria son relativamente simples y tienen que elaborarse meticulosamente para lograr el alto potencial de producción del proceso de reciclaje.

7.3.2.4 Resultados de laboratorio y especificaciones técnicas.

Esta es la parte más importante para realizar con éxito la ejecución de un proyecto y consta de los lineamientos a seguir partiendo de resultados de laboratorio y especificaciones técnicas que tendrán que regir cada proceso constructivo

Como se menciona en secciones anteriores para ejemplificar a mayor detalle el proceso el proceso de reciclaje en frío se hace énfasis a un proyecto en ejecutado en nuestro país para el caso “Reparación de fallas y finalización de las obras de rehabilitación de carretera CA-12 y CA-4, Acajutla –La Libertad”, el cual fue regido por los siguientes parámetros:

Base existente.

Espesor a reciclar de carpeta y base : 15 cm.

Tamaño máximo de granulometría: 2 pulg.

Compactación: \geq al 95% del proctor T-180

Número estructural existente: 1.85

Número estructural requerido: ≥ 3.0

Limite Liquido: No plástico

% Optimo de humedad: $9.2 \pm 2\%$

Peso volumétrico: 1995 Kg./cm^2

% Optimo de cemento: 3% de cemento hidráulico ASTM C-1157

Mezcla asfáltica

Porcentaje optimo de asfalto: $5.8 \pm 0.5\%$

Gravedad especifica Bula: 2.403

Gravedad teórica máxima: 2.503

Volumen de agregado mineral: 14.3

Volumen de llenado de agregados: 61.0

Relación de polvo/asfalto: 1.1

Porcentaje de vacíos: 4%

Temperatura de colocación: 120°C

Temperatura de compactación: 75°C

Asfalto para riego de liga: Asfalto rebajado 60-60 RC-250

Dotación de Asfalto para riego de liga: 0.3 gal./m^2

Viscosidad del asfalto en mezclado: 170 ± 20

Viscosidad del asfalto en compactación: 280 ± 30

Estructura del pavimento terminado.

Base reciclada: 15 cm.

Carpeta base de mezcla en caliente: 5 cm. de tamaño 1”

Carpeta de rodadura de mezcla en caliente: 3 cm. de tamaño ½”

$IRI \leq 3.0$

7.3.3 Trabajos preliminares al reciclaje.

Los trabajos preliminares al reciclaje deben realizarse a tiempo para permitir que la recicladora trabaje sin interrupciones. Detener el tren de reciclaje no solo consume tiempo valioso sino que también genera discontinuidades en el producto terminado. Al igual que las discontinuidades en otras operaciones constructivas (como la pavimentación con asfaltos), se crean áreas potenciales de falla en el pavimento; por esta razón deben evitarse, siempre que sea posible.

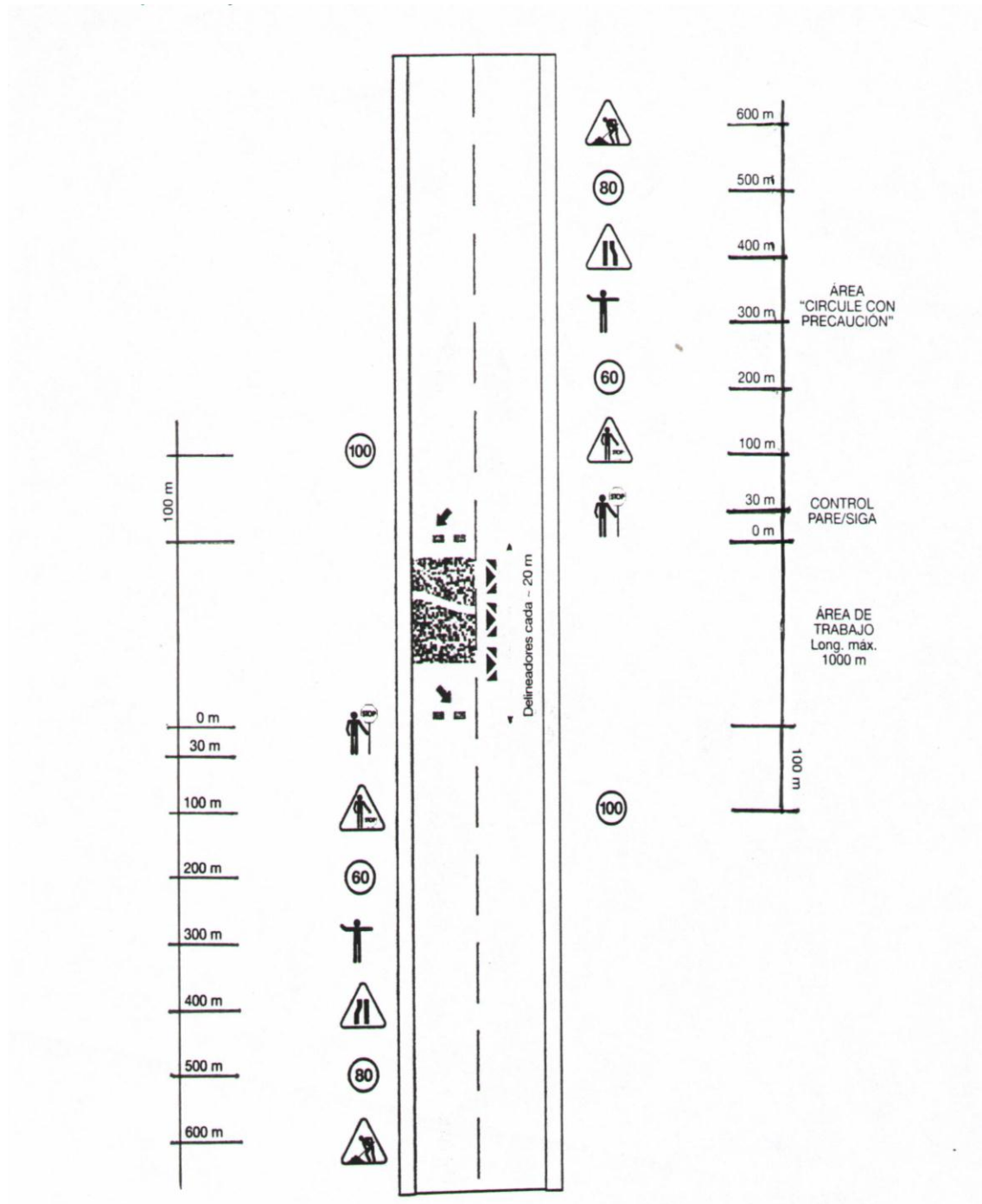
En los proyectos de reciclaje frecuentemente se requieren cuatro tipos de trabajos preliminares. Cada uno es considera por separado en las siguientes secciones.

7.3.3.1 Acomodación del tráfico público.

Al comparar con otros procesos de rehabilitación a profundidad total como la excavación y el reemplazo de capas ya falladas, el reciclaje en frío tiene un impacto relativamente bajo sobre la seguridad del público que pasa por la vía. Debido a que el proceso se realiza en una sola pasada y a las altas tasas de producción, es posible que sólo una porción de la vía esté cerrada a la vez (normalmente el ancho de un carril.) Con la planeación cuidadosa de los trabajos, el público puede disfrutar sin problemas por lo

menos de la mitad de la calzada, permitiendo controlar el tráfico utilizando señales sencillas de pare o luces para tal efecto.

Figura 7.10 Señalización típica requerida cuando se recicla en medias calzadas.



Debe cumplirse con los requisitos legales acerca de la disposición de avisos temporales de alerta a ambos lados de la sección de vía que se está reciclando, así como colocar conos grandes o delineadores cada 20 m a lo largo de la vía, demarcando la sección cerrada al tráfico. El control deficiente del tráfico puede tener como consecuencia mayores retardos de la obra (por ejemplo, vehículos que bloquean la trayectoria de la recicladora) y causar incluso interrupciones en el plan de trabajo si ocurre una colisión. Cuando estos problemas se presentan puede afirmarse casi invariablemente que su causa fue un control pobre en el tráfico. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de la distribución típica de los requisitos de señalización para un proyecto de reciclado.

7.3.3.2 Preparación de la superficie.

Antes del reciclaje deben corregirse las superficies que están muy deterioradas, asegurando así que el espesor de la capa terminada sea uniforme (tanto transversal como longitudinalmente) luego de que se alcanzaron los niveles requeridos de la superficie con la motoniveladora, o con la terminadora. Esto resulta importante, en particular cuando la capa reciclada es relativamente delgada (<125 mm).

Las correcciones de la forma y de la sección transversal de la vía incluyen cambios en el bombeo (sobre elevación), así como ajustes menores a la pendiente general para atenuar irregularidades pronunciadas, tales como montículos y depresiones. Los fallos profundos y los ahuellamientos deben considerarse dentro de este tipo de irregularidades, pero los asentamientos mayores y las renivelaciones que superen el espesor de la capa reciclada tienen que corregirse importando material nuevo. La conformación preliminar de la

superficie establece esencialmente su apariencia final, tanto transversal como longitudinalmente, antes del reciclado, asegurando así la integridad geométrica de la capa reciclada.

La conformación preliminar es relativamente fácil de alcanzar por uno o por la combinación de los siguientes métodos:

- Importando y extendiendo material sobre la superficie existente para lograr la forma requerida.
- Removiendo material de la superficie de la vía, normalmente sólo cuando hay profundidad suficiente de asfalto para permitir un fresado preliminar.
- Rasgando el material de las capas superficiales del pavimento existente, con una motoniveladora

En resumen toda el área a reciclar debe ser inspeccionada con el objeto de evaluar tramos que se requiera un tratamiento específico según las condiciones que se encuentren, esto con el objeto de garantizar que la capa reciclada se mantenga de un espesor constante y evitar obstrucciones que puedan afectar o entorpecer el proceso de reciclaje, algunos aspectos a considerar son los siguientes:

- Limpieza
- Perdidas de agregados en el pavimento existente
- Remoción de obstáculos

7.3.3.2.1 Limpieza.

Siempre debe tenerse en cuenta la limpieza de la superficie, para evitar impurezas y

materiales ajenos a los de trabajo que de alguna forma puedan afectar granulometrías, propiedades de los materiales existentes o nuevos (principalmente si son en caliente) y viéndose afectado el comportamiento del pavimento.

Este proceso generalmente se realiza con escobas y rastrillos.

7.3.3.2 Perdidas de agregados en el pavimento existente.

Después de una inspección del área de trabajo se debe sustituir la pérdida de agregados del pavimento fallado para mantener constante el espesor de material a reciclar y se deben investigar las causas y tratarlas para que no se repitan estas fallas en el nuevo pavimento.

7.11 Daños en la vía, con pérdida de material.

a) Baches



b) Perdidas de material en por daños en los bordes.



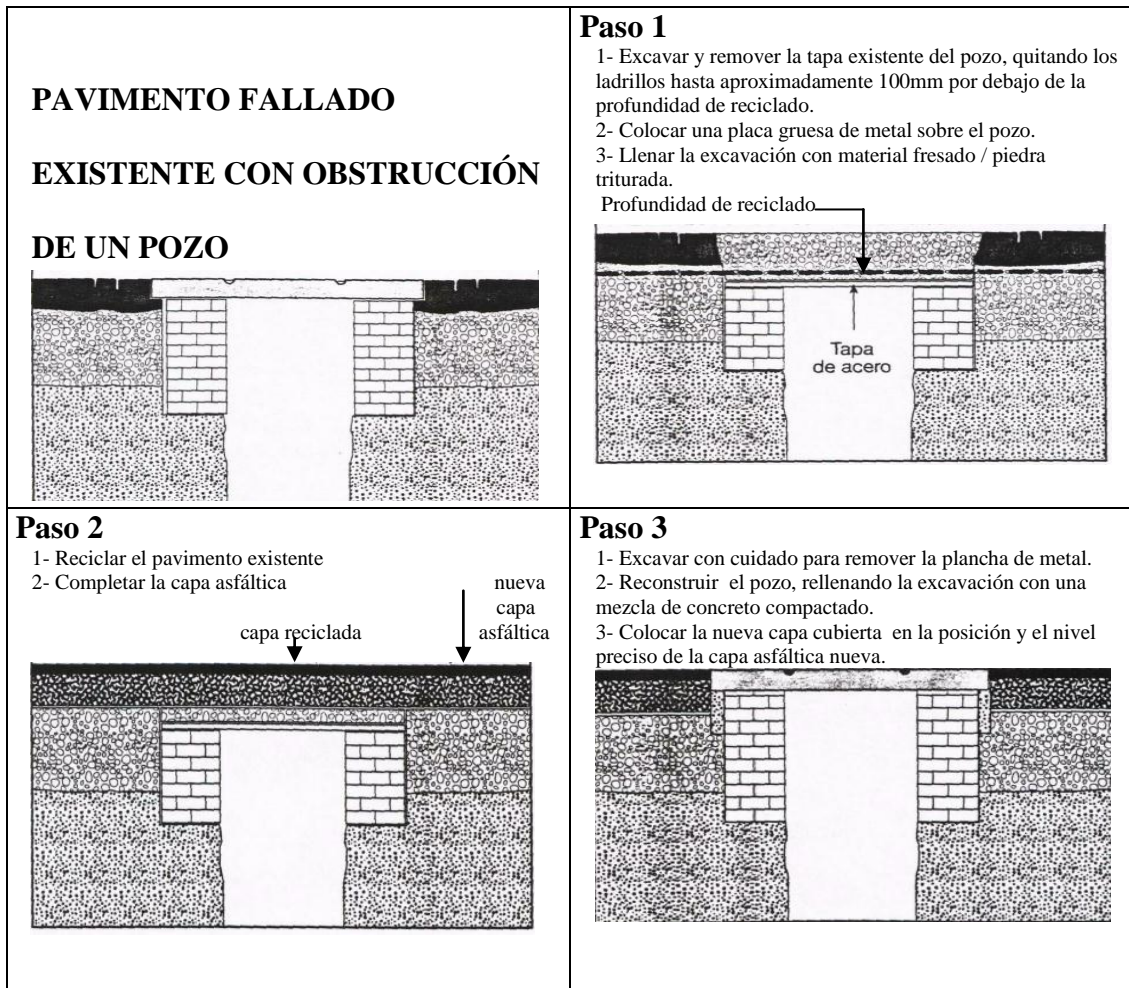
c) daños en toda la vía



7.3.3.2.3 Remoción de obstáculos

Al reciclar en calles urbanas se encuentran pozos de inspección y otras estructuras. Las tapas de los pozos deben removerse antes del reciclado, como se muestra en la Figura 7.12. Los beneficios de remover estas obstrucciones van más allá de permitir que la operación de reciclaje se realice sin interrupciones. La estructura resultante del pavimento es continua, tanto en espesor como en la consistencia del material, y puede construirse sin obstrucciones la capa asfáltica que usualmente se coloca sobre la capa reciclada. Una vez terminado el pavimento, la alcantarilla puede ponerse en la posición y en el nivel preciso sobre la nueva superficie, en donde, si se hubiera colocado una capa asfáltica sobre la estructura existente, habría resultado inevitablemente un desnivel.

Fig. 7.12 Remoción de obstáculos antes del reciclaje.



7.3.3.3 Conformación de la vía existente antes del reciclaje

Antes del reciclaje deben corregirse las superficies que están muy deterioradas, asegurando así que el espesor de la capa terminada sea uniforme (tanto transversal como longitudinalmente) luego de que se alcanzaron los niveles requeridos de la superficie con la motoniveladora, o con la terminadora. Esto resulta importante, en particular cuando la capa reciclada es relativamente delgada (<125 mm).

Las correcciones de la forma y de la sección transversal de la vía incluyen cambios en el bombeo (sobre elevación), así como ajustes menores a la pendiente general para atenuar irregularidades pronunciadas, tales como montículos y depresiones. Los fallos profundos y los ahuellamientos deben considerarse dentro de este tipo de irregularidades, pero los asentamientos mayores y las nivelaciones que superen el espesor de la capa reciclada tienen que corregirse importando material nuevo. La conformación preliminar de la superficie establece esencialmente su apariencia final, tanto transversal como longitudinalmente, antes del reciclado, asegurando así la integridad geométrica de la capa reciclada.

La conformación preliminar es relativamente fácil de alcanzar por uno o por la combinación de los siguientes métodos:

- Importando y extendiendo material sobre la superficie existente para lograr la forma requerida.

Removiendo material de la superficie de la vía, normalmente sólo cuando hay profundidad suficiente de asfalto para permitir un fresado preliminar.

7.3.3.3.1 Fresado preliminar al reciclaje.

El fresado y la remoción del material fresado resultante se ejecutan usualmente para permitir que se mantengan los niveles existentes de la superficie después del reciclaje, eliminando así el costoso trabajo asociado con el ajuste de las elevaciones del drenaje y de la demás infraestructura existente. Por lo general, esto sólo ocurre cuando se trabaja en zonas urbanas.

Como prerequisite para un fresado preliminar, debe revisarse el pavimento con el fin de asegurar que la porción superficial puede removerse sin perjudicar la resistencia de la estructura; además ha de verificarse el material subyacente para asegurar que el espesor requerido de la capa reciclada pueda alcanzarse sin utilizar material subyacente de mala calidad.

Normalmente, el fresado preliminar se restringe a pavimentos con múltiples capas de asfalto, colocadas a lo largo de los años.

Cuando se estima la profundidad del material que se va a fresar, se deben considerar tres factores. Éstos se muestran en la siguiente grafica, y pueden resumirse así:

- El efecto que cualquier agregado importado tendrá en el espesor de la capa reciclada.

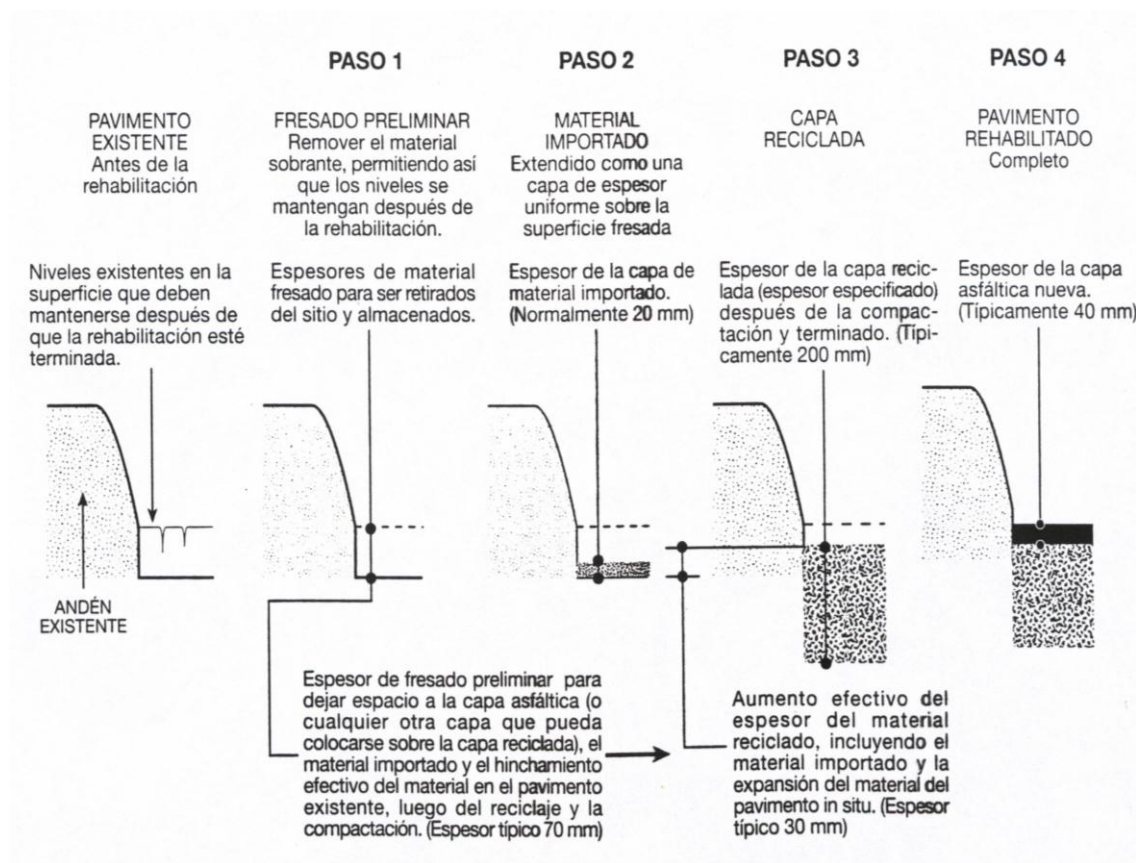
Esto es relativamente simple de estimar cuando se agrega material granular. Sin embargo, cuando se usa material fino, éste tiende a ser absorbido dentro de los intersticios del material reciclado. No es raro que el polvo de trituración menor de 6,7 mm "desaparezca" dentro del material reciclado que contiene predominantemente asfalto, en especial cuando se adiciona menos del 15 % en volumen. En efecto, las partículas finas se pierden dentro de los vacíos del material granular reciclado, produciendo un cambio imperceptible en el volumen.

- El tipo de material en el pavimento existente influye sobre la cantidad de "grumos" que se forman cuando éste se recicla. Una mezcla asfáltica siempre se expande aproximadamente un 10 % cuando se recicla como una capa estabilizada, fenómeno producido por el aumento relativo en el contenido de vacíos entre la capa asfáltica y el

material fresado estabilizado. En todo caso, dichas expansiones no suceden tan frecuentemente cuando se reciclan capas delgadas con emulsión asfáltica; y

- Los espesores de cualquier capa estructural adicional o de los tratamientos superficiales que van a construirse sobre la capa reciclada

Determinación de la profundidad de fresado inicial



7.3.3.2 Importación de material nuevo

La importación y extendido de material nuevo sobre la superficie de la vía antes del reciclaje se realiza por las siguientes razones:

- Para corregir el mal estado de la superficie, se importa material de una calidad tal que le permita mezclarse con las capas superiores del pavimento existente; luego se extiende

en la línea, al nivel requerido sobre la superficie de la vía, y se compacta ligeramente. Para evitar cuñas o lentes de material no tratado bajo la capa reciclada, es importante asegurar que el espesor del material importado no exceda la profundidad de reciclaje;

- Para mejorar la gradación del material reciclado. Cuando se reciclan capas asfálticas el material a menudo no tiene algunos tamaños de partículas que serían ideales para una gradación continua, especialmente la fracción fina (material que pasa el tamiz de 0,075 mm). Importar la fracción faltante y extenderla sobre la superficie de la vía mejora la gradación del producto reciclado. La decisión sobre cuáles fracciones deben añadirse se basa normalmente en las gradaciones de las muestras tomadas de la vía. Debe tenerse cuidado especial para asegurar que estas muestras sean representativas del material que se va a producir cuando se recicle; y

- Para aumentar el espesor de la capa reciclada sin afectar la estructura de soporte. Algunas veces el material de las capas superiores resulta insuficiente para garantizar el espesor requerido de la capa re-ciclada. Esto puede atribuirse a la mala calidad del material subyacente, o a la presencia de material inapropiado, como bases con partículas de gran tamaño. En estos casos, la importación de material permite que se alcance el espesor de diseño de la capa de pavimento.

7.3.3.3.3 Preparación del tren de reciclaje.

El reciclaje sólo debe empezarse una vez que se hayan cumplido todos los requisitos preliminares. Éstos incluyen, en orden secuencial:

- Revisar la temperatura de cualquier agente estabilizador bituminoso.

- Revisar detalladamente todas las máquinas y los equipos que se van a utilizar en la operación de reciclaje, incluyendo rodillos, máquinas extendedoras y carrotanques.
- Comprobar físicamente que la cantidad de agua o de agentes estabilizadores dentro de los diferentes carrotanques, esparcidores y mezcladoras sea suficiente para la longitud de corte programada. Donde sea posible, la cantidad de agentes estabilizadores bituminosos debe verificarse con una barra graduada para tal fin.
- Ensamblar el tren de reciclaje con las barras de empuje (o con el remolque) en la línea del primer corte; Conectar todas las mangueras de alimentación a la recicladora, sacar todo el aire del sistema y asegurarse de que todas las válvulas estén completamente abiertas.
- Revisar que el operador de la recicladora posea toda la información concerniente a la tasa de aplicación de los agentes estabilizadores para que la digite en el computador, que tenga una línea guía clara en toda la longitud de corte y que entienda a la perfección los procedimientos para el inicio de la operación.

Las revisiones preliminares son rápidas y fáciles de realizar, y deben convertirse en una práctica rutinaria cada vez que comienza un turno de trabajo. Además de la revisión de la recicladora, también es aconsejable verificar que los operadores y los conductores de todas las máquinas y los vehículos entiendan claramente sus responsabilidades y lo que se espera que hagan para que la operación de reciclaje sea exitosa.

7.3.4 operación de reciclaje

Esta etapa comprende todos aquellos procesos constructivos que dan como finalización el pavimento rehabilitado:

- Extensión del agente estabilizador
- Avance del tren de reciclaje
- Nivelación de la superficie
- Compactación.
- Acabado de la superficie.

7.3.4.1 Extensión del agente estabilizador.

Como se definió anteriormente la extensión manual del estabilizador, se realiza nada más en proyectos pequeños. En caso de utilizarse dosificadores en polvo, es preferible emplear equipos con el vertido regulado por la velocidad de avance. La dosificación prevista de cemento debe extenderse lo más uniformemente posible sobre la superficie a reciclar. Para reducir al mínimo las pérdidas de cemento provocadas por el viento, y sobre todo evitar las molestias que ello origina en la puesta en obra, es conveniente que haya una buena sincronización entre los equipos de extensión del conglomerante y de fresado del firme, de forma que la longitud de cemento por delante de este último sea lo más reducida posible. También con este objetivo, algunas recicladoras llevan incorporado un depósito de conglomerante.

La innovación más interesante en este sentido es un equipo provisto de un depósito de cemento, otro de agua y un mezclador de suspensión agua – cemento, para incorporar la lechada resultante directamente dentro de la recicladora. La dosificación del cemento es así muy precisa. Prácticamente su única limitación de empleo es en los casos en los que la humedad de las capas a reciclar se encuentra próxima a la óptima del ensayo Proctor modificado. En algunos países se están desarrollando sistemas para inyectar directamente el cemento en polvo.

Dependiendo del sistema de ejecución, el cemento se extenderá antes o después de escarificar y disgregar el firme. Si, como es habitual, la recicladora realiza conjuntamente las operaciones de escarificado y mezclado, el cemento deberá extenderse previamente o incorporarse como lechada en el mismo proceso en la proporción correspondiente.

Para la rehabilitación de la carretera La Libertad-Acajutla existe una limitante en el uso de equipo para esparcir el cemento y es que se debe considerar el rendimiento de la máquina recicladora, el tiempo de compactación y sobre todo el tiempo requerido para lograr los resultados más óptimos de estabilizar con cemento que para el caso no se puede sobrepasar de una hora, para ejecutar todo el proceso de reciclaje.

Distancia de separación entre los sacos de cemento.

Es importante haber determinado antes de la colocación del cemento la distancia o tramo que será reciclado, tomando en cuenta que una hora después de haber esparcido el cemento se debe escarificar el pavimento, nivelar y compactar.

La forma de determinar la separación de los sacos de cemento y lograr el 3% establecido dentro de la mezcla reciclada; es a través del peso volumétrico de la mezcla reciclada obtenido mediante los ensayos de laboratorio y el peso del cemento como se muestra a continuación:

Partiendo de las siguientes condiciones:

Peso volumétrico de la mezcla reciclada ($\gamma_{\text{mezcla reciclada}}$)= 1995.0 Kg./m³

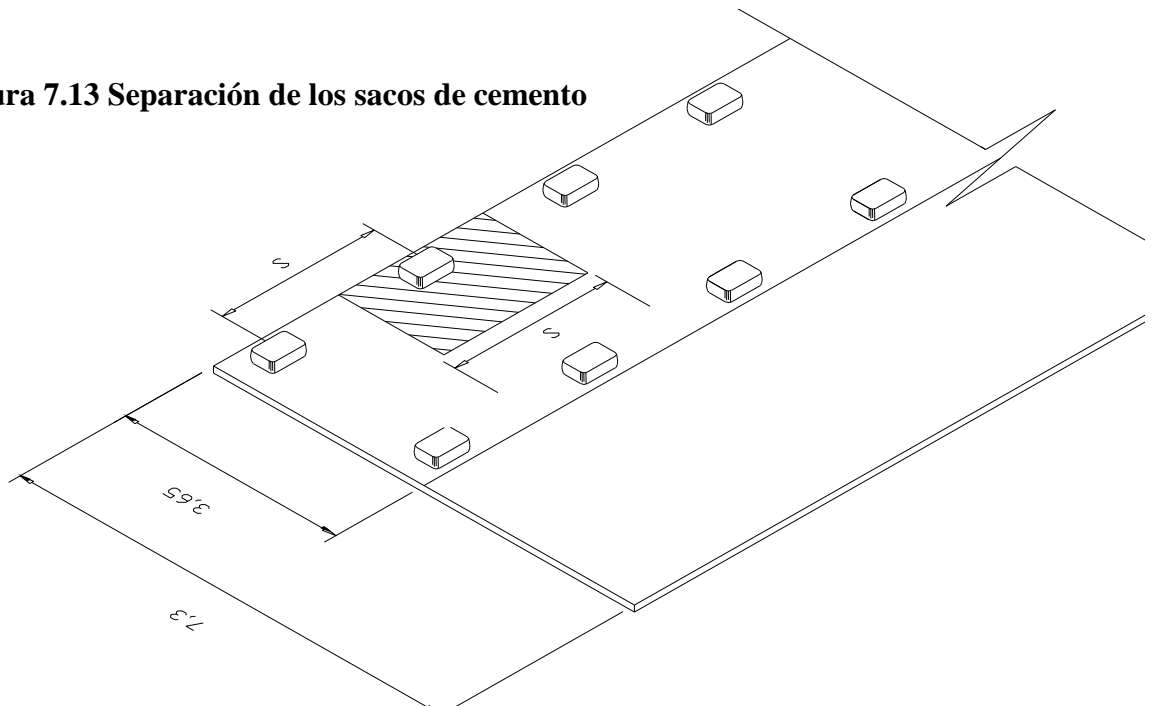
% de cemento (%) = 3%

Peso pro saco de cemento = 42.5 Kg.

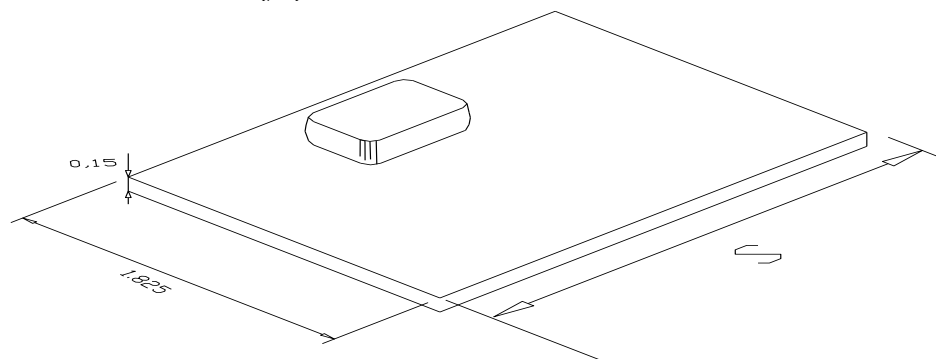
Peso de la mezcla reciclada ($W_{\text{mezcla reciclada}}$)=?

Figura 7.13 Separación de los sacos de cemento

a)



b)



Peso volumétrico = peso / volumen

$$\gamma = W/V \longrightarrow W_{\text{mezcla reciclada}} = \gamma_{\text{mezcla reciclada}} / V_{\text{mezcla reciclada}}$$

$$W_{\text{mezcla reciclada}} = 1995.0 * 0.15 * 1.825 * S$$

$$W_{\text{mezcla reciclada}} = 546.13 * S$$

Como el peso del cemento equivale al 3% del peso de la mezcla:

$$W_{\text{mezcla reciclada}} * \% = \text{Peso del saco de cemento}$$

$$W_{\text{mezcla reciclada}} * 0.03 = 42.5$$

$$546.13 * S * 0.03 = 42.5$$

$$S = 2.59 \sim 2.5m$$



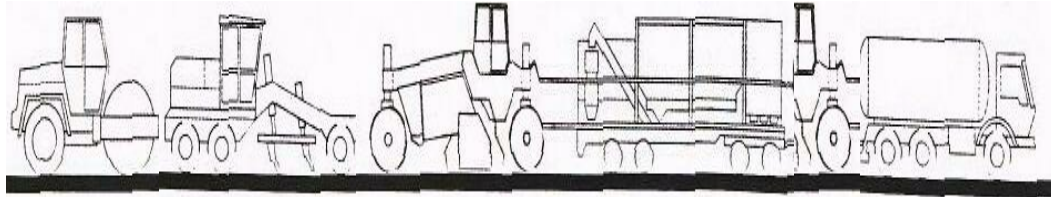
Figura 7.14

a) Colocación manual de los sacos de cemento

b) Esparcido del cemento.

En la figura 7.14 se observa la forma de colocar el cemento manualmente a una distancia especificada, que garantice el 3% dentro de la mezcla reciclada y como posteriormente son retirados para esparcirlo con palas.

7.3.4.2 Avance del tren de reciclaje



Compactadora Motoniveladora Recicladora Recicladora Tanque

Rara vez se experimentan problemas durante la operación del reciclaje, cuando se siguen correctamente los procedimientos iniciales (descritos anteriormente). De todas maneras, una vez que el tren de reciclaje esté avanzando, deben hacerse una serie de revisiones continuas por parte de un supervisor experimentado para asegurar que el trabajo está dando los resultados requeridos. Es importante prestar atención a ciertos detalles, especialmente:

- A la profundidad de corte a ambos lados de la recicladora.
- A que la recicladora siga la línea de corte establecida con el ancho de traslapo especificado.
- A que el contenido de humedad del material tratado sea suficiente para garantizar una apropiada compactación. Un supervisor experimentado puede determinar esto a simple vista.
- A que el producto reciclado llene las expectativas. El viejo adagio "Si se ve bien, entonces está bien" puede aplicarse al reciclaje, así como a muchos otros procesos de construcción.

El tipo de agente estabilizador empleado determina la longitud ideal de corte que debe reciclarse antes de girar o dar reverso a la máquina para trabajar el corte adyacente. Cada uno tiene requerimientos diferentes:

- Cuando se trabaja con cemento, normalmente se tratan secciones más cortas, permitiendo así que se pueda reciclar media calzada, nivelar, compactar y terminar la superficie antes de que el cemento haya tenido tiempo para hidratarse.

Si trabajamos con Emulsiones Asfálticas:

- El tamaño del carrotanque utilizado cuando se estabiliza con emulsión asfáltica o con asfalto espumado (para proyectos grandes es ideal un semirremolque de aprox. 25000 l).

Antes de dar reverso (o girar) el tren de reciclaje, es común continuar el corte hasta que el carrotanque esté vacío. Girar el tren normalmente requiere desacoplar sus diferentes componentes y, por esta razón, generalmente se prefiere dar reversa.

Hay que tener en cuenta dos puntos más en cuanto a la adición de agentes estabilizadores:

- El material fresado tiende a deslizarse por la pendiente cuando la recicladora está trabajando en una sección transversal a desnivel. Esta tendencia empieza a ser apreciable cuando la pendiente es de más del 2 % y es más pronunciada cuando se reciclan capas con espesores pequeños (< 150 mm). Es aconsejable utilizar una motoniveladora para regresar el material a su lugar antes de ejecutar el corte adyacente, manteniendo así la forma de la vía y asegurando una junta adecuada. En todo caso, cuando la pendiente transversal excede el 6 % la migración se vuelve excesiva, requiriendo así atención especial.

- El consumo real de agentes estabilizadores siempre debe revisarse físicamente, haciendo un reconocimiento de la cantidad de agente estabilizador colocado en el área tratada.⁵⁶

Para el proyecto en ejecución mostrado en las siguientes imágenes el tren de reciclaje está conformado en su primera parte por:

- Carrotanque de agua o tanque cisterna.
- Recicladora WIRTGEN con un ancho de reciclaje de 1.90m
- Recicladora CAT con un ancho de reciclaje de 2.40m



7.15 Tanque cisterna

⁵⁶ Basado en el manual de reciclaje en frío Wirtgen



7.16 recicladora WIRTGEN



7.17 Reciladora CAT

A fin de asegurar una buena homogeneidad del material reciclado y una profundidad uniforme de mezclado, debe utilizarse una recicladora con la potencia adecuada. Por otra parte, cuando el reciclado se realiza por bandas, éstas deben solaparse suficientemente (del orden de unos 20 cm), para no dejar materiales sin mezclar en los bordes de las mismas.

El ritmo de avance de la recicladora está muy condicionado, como es lógico, por la profundidad del tratamiento y la dureza de los materiales existentes. En condiciones favorables de poco espesor (20 cm) y materiales blandos se han llegado a superar los 10 m/min. No obstante, el rendimiento medio está muy condicionado por otros factores, como las paradas para el suministro de cemento o la reposición de picas. Son habituales valores entre 4 000 y 8 000 m²/día.

Se hace énfasis en que al referirse a que el ritmo de la recicladora está condicionado, esto también implica que todo el tren de reciclaje lo está principalmente el tanque cisterna y la recicladora que deben de ir a una misma velocidad, para el caso la velocidad de avance fue de 5.0 m/min. Considerando así los dos aspectos siguientes:

- 1- El tanque cisterna debe descargar la cantidad de agua necesaria para producir en la mezcla el porcentaje óptimo de humedad de $9.2 \pm 2\%$.
- 2- Para las recicladoras como en los reciclajes en frío se acostumbra reciclar anchos de carilera que es de 3.65 m las recicladoras se traslapan para reciclar un ancho.

7.3.4.3 escarificado y mezclado

Una vez inicia el avance del tren de reciclaje, se va realizando el proceso de escarificado y mezclado del firme existente con el cemento.



Fig. 7.18 Proceso de escarificado y mezclado

La primera sección reciclada de cada sitio debe asumirse como una práctica para determinar cómo se comportará el material del pavimento existente. Por lo general una sección inicial debe ser de aproximadamente 100 m y cubrir el ancho completo de carril o media calzada de la vía. Este trabajo les dará una idea a los operadores y a los supervisores de los tres aspectos más importantes en la operación de reciclado, a saber:

La gradación del material reciclado debe revisarse el material producido por la recicladora para determinar si es similar al de las muestras que se utilizaron para el diseño de la mezcla en el laboratorio. Con un tamizado rápido puede determinarse si el diseño de mezcla es aplicable o no para la sección.

La velocidad de rotación del tambor reciclador y la velocidad de avance de la máquina influirán sobre la gradación del material reciclado. Además, tanto la recicladora CAT como la WIRTGEN deben ajustarse para lograr el tamaño máximo de las partículas.



Fig. 7.19 Verificando el espesor escarificado

Las capas asfálticas en pavimentos viejos ya fallados tienden a tener bajos contenidos de vacíos, y los materiales naturales (granulares) están, por lo regular, bastante densificados. El reciclaje de estos materiales produce normalmente un aumento en el volumen, que afecta los niveles finales de la capa terminada.

Medir el tiempo requerido para realizar una sección inicial de prueba brinda a los operadores, supervisores y directores una oportunidad ideal para experimentar y entender el comportamiento de los materiales, sin las presiones de las demandas en la producción.

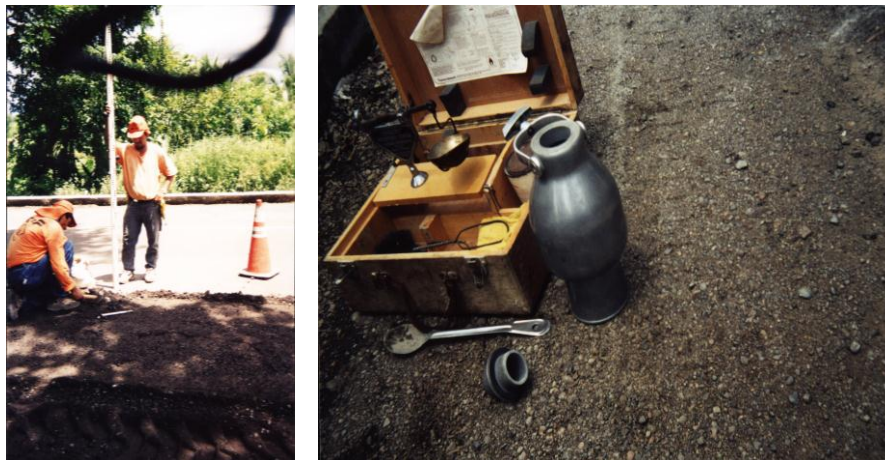


Fig. 7.20 Verificando la humedad del material previo a la compactación.

Como se observo en la figura 7.18 la WIRTGEN proporciona una superficie del área reciclada lista para compactar mientras que la CAT requiere para conformar la superficie el uso de una motoniveladora o la conformación con palas.

El trabajo requerido por la motoniveladora después del extendido del material está determinado por el tipo de cubrimiento que se pondrá sobre la capa terminada. Si es una capa asfáltica de espesor significativo, entonces las tolerancias serán invariablemente más generosas que en el caso de que sólo se aplique un sello. Donde las tolerancias son relativamente bajas, el ancho completo tratado debe enrasarse con una motoniveladora para remover las inconsistencias (pequeños escalones de unos 10 mm), que normalmente se forman a lo largo de las Juntas longitudinales. Además, una motoniveladora es útil para corregir el intercambio de material que algunas veces ocurre en las juntas transversales. De todos modos, debe restringirse el uso de la motoniveladora. Ciertos materiales reciclados tienden a ser gruesos, particularmente aquellos que se utilizan en

capas asfálticas gruesas. Estos materiales son susceptibles de presentar segregación, y debe evitarse todo movimiento innecesario en éstos.



Fig. 7.21 Nivelando la superficie.

7.3.4.4 Compactación.

Compactar el material reciclado para obtener la densidad especificada es uno de los factores más importantes en el desempeño futuro del pavimento rehabilitado. Un material mal compactado se densificará bajo la acción del tráfico, causando ahuellamientos prematuros. De cualquier manera, cuando el material estabilizado no se compacta apropiadamente, el problema se intensifica, pues además del ahuellamiento temprano, no se alcanzará la resistencia requerida de la capa y el pavimento presentará fallas prematuras. Es entonces imperativo que se le dé a la compactación del material reciclado la misma importancia que a la de las bases tratadas con cemento para construcciones nuevas.

La compactación de capas gruesas (>200 mm) en una sola etapa es actualmente una práctica normal en muchos países. De todas maneras, para lograr el éxito hay que

emplear máquinas compactadoras adecuadas. Muchos fabricantes de equipos de compactación ofrecen una gama de servicios especializados, entrenando a los clientes en la utilización de sus equipos y guiándolos en la selección del más adecuado para cada trabajo específico. La tecnología de la compactación es un tema bien investigado y documentado, y dada la gran variedad de compactadores disponibles en la actualidad, no hay razón para que las capas de espesores considerables no puedan compactarse en una sola etapa.

Actualmente, la herramienta más utilizada para la compactación de capas gruesas es el compactador pesado vibratorio de frecuencia dual (> 15 toneladas de masa estática). Cuando se utiliza este tipo de equipo, es importante asegurar que primero se compacte con una vibración de baja frecuencia y gran amplitud, para densificar la parte inferior de la capa. Luego debe compactarse la parte superior de la capa con alta frecuencia y baja amplitud. Además, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos cuando se utilizan compactadores vibratorios:

- La vibración de baja frecuencia y gran amplitud tiende a afectar el material en la parte superior de la capa, desprendiendo la superficie. Esto se rectifica fácilmente rasando la superficie con una motoniveladora antes de aplicar la vibración.
- El contenido de humedad es la variable más crítica para lograr la densificación con el mínimo esfuerzo. Debido a la demora entre el reciclaje y la terminación del proceso, se recomienda aplicar un pequeño riego de agua sobre la superficie antes de la compactación final.

- Una falla cometida en muchas obras es la "sobrecompactación", que se presenta cuando se compacta demasiado. El material se romperá y perderá densidad si se continúa la compactación después de que se ha alcanzado la máxima densidad.

Hay que tener en cuenta un punto adicional acerca de la compactación del material reciclado:

- Los materiales de gradación fina con baja plasticidad tienden a fallar por corte bajo la acción de la compactadora, causando desplazamiento lateral. El agua es la mejor ayuda para la compactación de estos materiales, pero incluso cuando se trabaja en el contenido óptimo de humedad es difícil mantener una superficie final aceptable, requiriendo así una pasada adicional con la motoniveladora para eliminar las distorsiones inducidas por el compactador. De todos modos al ejecutar este corte final debe tenerse especial cuidado para asegurar que toda la superficie se engrasa y que no quedan lentes delgados de material depositados en depresiones poco profundas, formando así "galletas" que no están unidas al material subyacente.

Una compactación enérgica es fundamental para obtener la resistencia necesaria y un buen comportamiento del firme reciclado, por lo que debe alcanzarse la mayor densidad posible. Es recomendable conseguir el 100% PM, y en todo caso el 97% PM como valor medio en el espesor reciclado. Ello requiere la utilización de equipos potentes, sobre todo teniendo en cuenta los fuertes espesores usuales en las capas recicladas con cemento, y que en general se trata de materiales más agrios que los utilizados en capas granulares.

En general, es conveniente que el equipo de compactación esté compuesto, como mínimo, por un rodillo vibratorio y un compactador de neumáticos, o bien por un rodillo mixto. En algunas obras se han empleado con buenos resultados dos rodillos vibratorios. La composición del equipo de compactación, así como el número de pasadas necesario, han de definirse mediante un tramo de ensayo.



Fig. 7. 22 Compactado de la superficie hasta lograr la densidad requerida y un buen acabado en la superficie.

7.3.4.5 Terminado de la superficie

El terminado de una capa reciclada requiere dejar una textura superficial cerrada que evacue el agua. Esto se logra normalmente humectando y utilizando un compactador de ruedas neumáticas (este proceso se denomina "pulimento") para darle suficientes finos a la superficie y llenar así los vacíos entre las partículas más gruesas. Estos procedimientos se incluyen al final del proceso de compactación, pero cuando la vía se va a abrir al tráfico de inmediato, o cuando la utilización de un agente estabilizador impone un límite de tiempo, deben completarse oportunamente.

Tal como con las nuevas construcciones, los requerimientos para finalizar la superficie de una capa reciclada los determinan la naturaleza del material y el tipo de agente estabilizador utilizado. Cuando el material procesado tiene un alto porcentaje de asfalto, el material resultante en el reciclaje tenderá a ser grueso y sin cohesión, siendo así difícil de terminar. Si estas condiciones se identifican a tiempo, se puede adicionar material fino durante el proceso de reciclaje para modificar el producto y aliviar los problemas del terminado.

Cuando se anticipa que la capa reciclada va a utilizarse por un período largo antes de ser cubierta, debe protegerse la superficie para prevenir la pérdida de material, la aparición de baches y otras formas de degradación. La cantidad de tráfico, así como el material y el tipo de agente estabilizador utilizado, gobierna las medidas preventivas necesarias. La aplicación de un sello superficial con arena de río o un agregado de tamaño nominal de 6,7 Mm. protege en forma adecuada, pero con la utilización de una emulsión diluida (30 % de asfalto residual) en el proceso de "pulimento" se obtendrán resultados

sorprendentemente positivos, logrando una superficie enriquecida con asfalto a un costo mínimo.

7.3.4.6 Juntas y traslapos

Cuando se recicla se encuentran dos tipos de juntas: longitudinales, que van paralelas a la línea central de la vía, y transversales, que van perpendiculares a esta línea. Todas las juntas son esencialmente discontinuidades en el pavimento y, a menos que se traten apropiadamente, tienen el potencial de afectar la integridad estructural de la capa reciclada. Las juntas longitudinales y transversales son muy diferentes, y por esta razón se consideran independientemente.

7.3.4.6.1 Juntas longitudinales

El ancho de corte de la recicladora normalmente es menor que el ancho de la vía. Para reciclar el ancho total se necesitan varias pasadas (o cortes), que producen una serie de juntas longitudinales, entre cortes adyacentes. Para garantizar la continuidad entre cortes adyacentes se requieren traslapos a lo largo de cada junta. Únicamente en el primer corte se reciclará material virgen en todo el ancho del tambor. Por este motivo, el ancho efectivo de los cortes subsecuentes se verá reducido en el ancho del traslapo; de todas maneras, los agentes estabilizadores deben aplicarse sólo sobre el ancho de corte que no resultará afectado por ningún traslapo futuro. De aquí que el último corte de la secuencia a través del ancho de la vía (o de la mitad del ancho) será el único que recibirá el agente estabilizador para el ancho completo del tambor. Esto impedirá volver a mezclar el

material ya tratado en el ancho del traslapo.

El número de cortes necesarios para el reciclaje del ancho total de vía y la ubicación de cada junta longitudinal están regidos por:

- El tipo de máquina recicladora utilizada en el proyecto, en particular el ancho del tambor.
- El ancho mínimo de traslapo normalmente es de 100 mm, pero a veces se aumenta teniendo en cuenta el espesor de las capas (> 300 mm), lo grueso del material reciclado, el tipo de agente estabilizador y el lapso que transcurra entre la ejecución de cortes adyacentes. Generalmente el ancho del traslapo debe aumentar con el espesor de la capa, con el tamaño de los materiales, y cuando se trabaja con agentes estabilizadores cementantes donde el primer corte fue realizado más de doce horas antes de comenzar el corte adyacente;
- El ancho de vía que se va a reciclar y los detalles de la sección transversal. Las vías con bombeo deben tratarse preferiblemente por medias calzadas para lograr en la corona una profundidad uniforme de reciclaje; y
- Debe evitarse que la ubicación de las juntas longitudinales esté sobre la huella de los vehículos pesados que se desplazan lentamente.

La elaboración de un plan de cortes detallando cada traslapo es uno de los primeros requisitos cuando se planea un proyecto. El traslapo debe restarse del ancho del tambor para determinar el ancho efectivo de reciclaje para cada corte el cual, a su vez, gobierna la cantidad de agua y agente estabilizador que se va a utilizar, como se muestra en la Figura 7.23

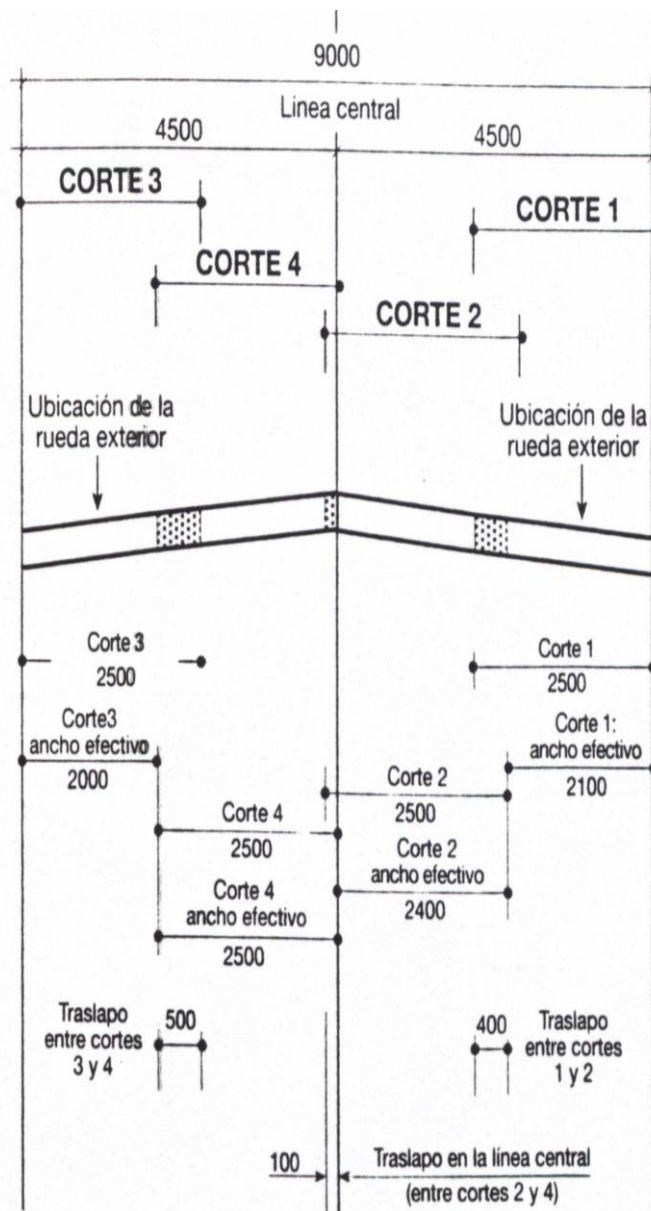


Figura 7.23 Plan típico de cortes que muestra los traslapes en las juntas⁵⁷

El traslape apropiado de juntas es un factor importante en el desempeño final de la capa reciclada. Como se dijo anteriormente, las juntas son discontinuidades en la estructura del pavimento y por esta razón se les debe prestar la atención que merecen. Cuando se

⁵⁷ Basado en el manual de reciclaje en frío Wirgent, y los anchos de reciclado pueden variar pero se deberá mantener los traslapes mínimos

presentan problemas, éstos se deben generalmente a la operación inapropiada de la recicladora, generando franjas no recicladas entre cortes adyacentes. Para ayudar al operario a conducir correctamente la recicladora, deben establecerse guías claras con marcas de pintura sobre la superficie existente, o tender una cuerda que forme una línea fácilmente visible. Por lo general, sólo los primeros cortes necesitan demarcación, ya que de ahí en adelante se sigue la línea del corte anterior. En todo caso, antes de comenzar un nuevo corte, es importante revisar que la línea guía se note claramente sobre la longitud total del corte.

7.3.4.6.2 Juntas transversales.

Las juntas transversales son discontinuidades a través del ancho de corte y se forman cada vez que la operación de reciclaje empieza o se detiene. Cada parada, incluso las que sólo toman unos minutos para cambiar los carrotanques, crea una junta que es esencialmente un cambio en la uniformidad del material reciclado. Se debe entonces intentar minimizar las paradas, y donde éstas sean inevitables, tratar cuidadosamente la junta resultante.

La clave para tratar apropiadamente estas juntas es entender qué sucede dentro de la cámara de mezclado de la recicladora, en particular en el proceso de adición de los agentes estabilizadores. Muchos problemas resultan del exceso o defecto en la aplicación de los agentes estabilizadores o del agua en la junta. Dos de los aspectos más importantes en cuanto a las juntas transversales son:

- Cuando se inicia el reciclaje, todos los procesos deben seguirse cuidadosamente, sobre todo aquellos requeridos para sacar el aire de las líneas de suministro de los agentes estabilizadores fluidos y de agua. Todo el aire atrapado en estas líneas debe removerse antes de que el fluido alcance la flauta dosificadora. Si no se realiza la remoción apropiada de estas burbujas es posible reciclar varios metros sin aditivo, teniendo como resultado una sección no estabilizada (o seca) del pavimento.

- Antes de reanudar los trabajos, después de una parada temporal, el tren de trabajo debe ser devuelto por lo menos el diámetro del tambor (aproximadamente 1,5 m) sobre el material previamente reciclado. Con esto se asegurará que todo el material reciba tratamiento cuando se reanuda el proceso.

Como en los pavimentos asfálticos, los problemas producidos por las juntas transversales sólo surgen cuando la operación se detiene. El tren de reciclaje debe entonces detenerse únicamente cuando los carrotanques están vacíos, o en otra situación similar.

7.3.4.7 Carpeteo

Generalmente el espesor reciclado del pavimento ejerce la función de una base estabilizada ya sea con emulsión asfáltica o para lo que tradicionalmente se esta utilizando en nuestro país que es el cemento.

Para el proyecto de la carretera La Libertad-Acajutla es lo que sucedió y sobre la base reciclada con cemento se colocó una carpeta asfáltica de 8.0 cm. de espesor, no sin antes haber colocado un sello de liga de asfalto rebajado RC-250 en una dotación de 0.30

gal./m² que sirviera de adhesivo (imprimado) entre la carpeta asfáltica y la base reciclada.

La carpeta asfáltica fue subdividida en dos subcarpetas de la siguiente forma:

- 5.0 cm. de mezcla abierta en caliente con tamaño máximo de 1 pulg. en todo el ancho de la vía incluyendo hombros, los 12.0 m.)
- 3.0 cm. de mezcla densa en caliente con tamaño máximo de ½ pulg. en los anchos de carriles (No incluye los hombros).



Fig. 7.24 Colocación de carpeta asfáltica en caliente

Se hace énfasis en que el objetivo del uso de mezcla abierta en la subcarpeta de 5 cm. de espesor tenía como fin absorber todos aquellos posibles fisuramientos que se dan en un material estabilizado con cemento y que estos no se proyectaran a la superficie, mientras que la subcarpeta de 3.0 cm. de espesor tenía como objetivo el confort del usuario.

Por otra parte tenemos el caso del reciclado de pavimento realizado en la carretera “Comalapa-Zacatecoluca”, en donde para evitar la proyección de fisuras en la carpeta de rodadura, se hizo necesario el uso de un geotextil, el cual funciona como una barrera impermeabilizante.



Fig. 7.26 Colocación de geotextil⁵⁸

⁵⁸ Proporcionada por la UIDV del Ministerio de obras publicas (MOP) de El Salvador

7.4 RECICLADO EN CALIENTE⁵⁹

7.4.1 Introducción

La experiencia ha demostrado que para una ingeniería óptima, el reciclado en caliente es un 30% más económico, ya que:

- En una pasada se logra recuperar el pavimento asfáltico existente.
- Se replastifica y estabiliza.
- Se reconstituye con materiales correctivos y rejuvenecedores.
- Se coloca y compacta.
- Se da al tráfico inmediatamente.

El pavimento existente presenta:

- ✓ Deformaciones superficiales
- ✓ Adherencia insuficiente
- ✓ Desgaste incrementado
- ✓ Estabilidad deficiente
- ✓ Disminuido por el clima

Un viejo pavimento se convierte económicamente en:

- ✓ Superficie suficientemente plana
- ✓ Adherencia en orden
- ✓ Resistente al desgaste

⁵⁹ La información del método de reciclaje en caliente fue proporcionado por la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV) del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador (MOP).

- ✓ Estabilidad completamente en orden
- ✓ Resistente a cambios climáticos

El método WIRTGEN para rehabilitación de pavimentos está establecido en todo el mundo y es reconocido por su eficiencia de costos tales como:

- Es usado el 100% del material de pavimento existente.
- Los componentes de las mezclas individuales pueden ser modificados para dar un óptimo diseño de la mezcla asfáltica.
- El rápido reciclado en el lugar resulta una perturbación mínima del tráfico.
- El camino es abierto al tráfico a medida que el trabajo progresa.

Los procedimientos y técnicas descritos en las páginas siguientes se refieren esencialmente a la operación la máquina recicladora REMIXER 4500 marca Wirtgen, mostrada en la Figura 7.27 y 7.28 a y b.



Figura 7.27 Máquina REMIXER 4500 realizando reciclaje en caliente en la carretera hacia Los Chorros⁶⁰.

REMIXER 4500. El modelo más grande en la flota de maquinarias Wirtgen, con un ancho máximo de trabajo de 4.5 m en una pasada de la máquina.

⁶⁰ Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador.

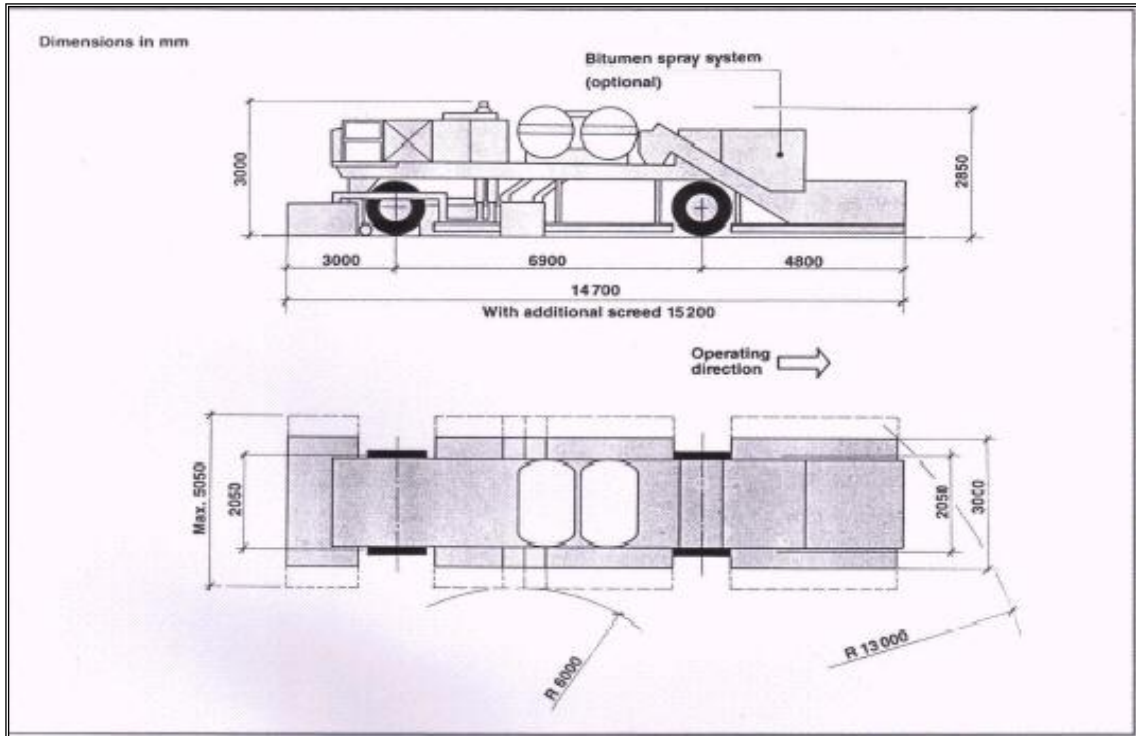
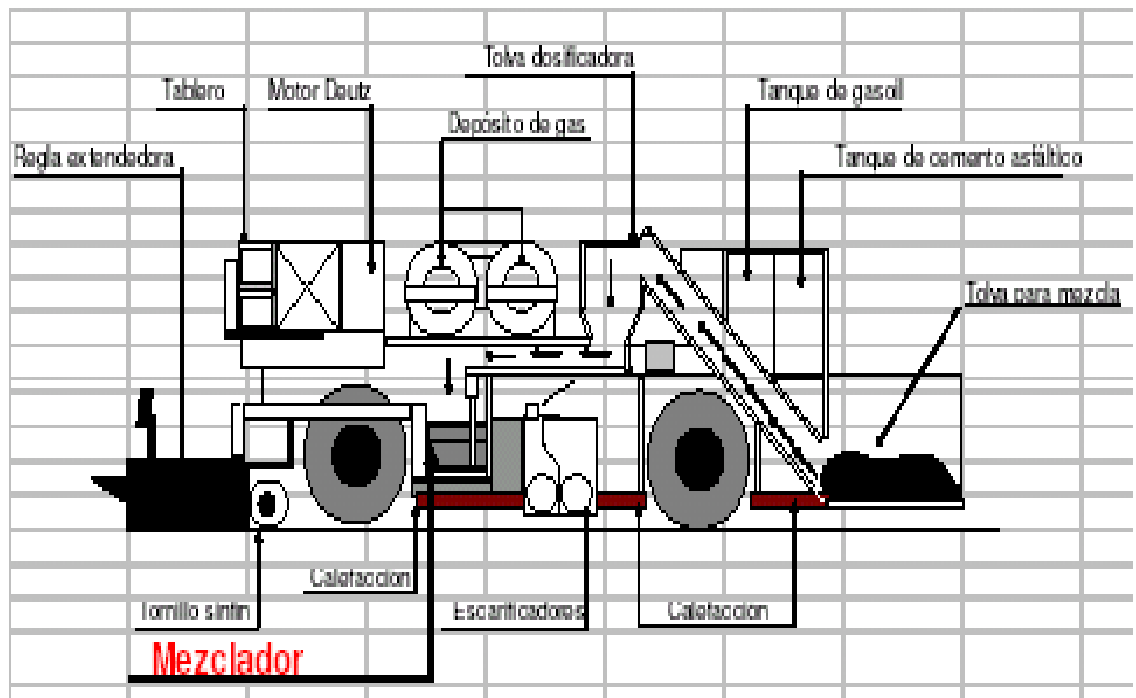


Figura 7.28 a) Diagrama de Remixer 4500 ilustrando varios de sus componentes y las dimensiones de la maquina en mm



7.28 b) Partes de las que consta la Remixer 4500

7.4.2 Métodos de reciclaje en caliente

Los siguientes métodos de rehabilitación pueden ser considerados para restaurar las propiedades de pavimentos asfálticos como el que se muestra en la figura 7.29.

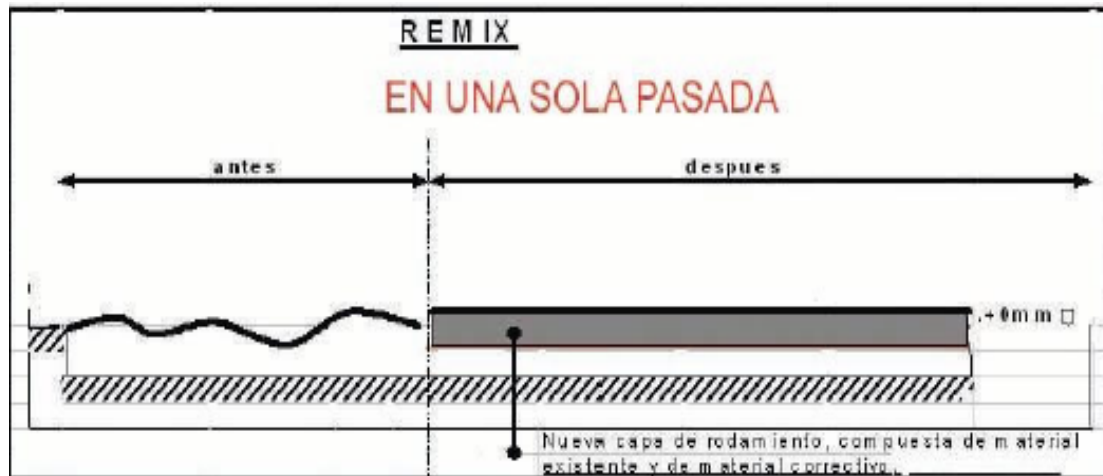


Figura 7.29 Muestra lo que se puede realizar con la maquina Remixer 4500

7.4.2.1 Método de reciclaje en caliente Re - formado.

Como se puede deducir del término, el re-formado es un proceso de re-perfilado.

Los surcos de las llantas y otras deformaciones son removidos escarificando el pavimento existente y recolocándolo en su verdadero perfil (Figura 7.30).

Adicionalmente, la pendiente puede ser alterada, dentro de ciertos límites, para mejorar el drenaje.

Para alteraciones sustanciales en la pendiente del camino, y para obtener una mezcla más homogénea, el material escarificado debería ser pasado a través del mezclador en lugar de ser simplemente colocado, ya que los restos dejados atrás de la escarificadora rotatoria limitarán el mezclado del material y alterarán el perfil.

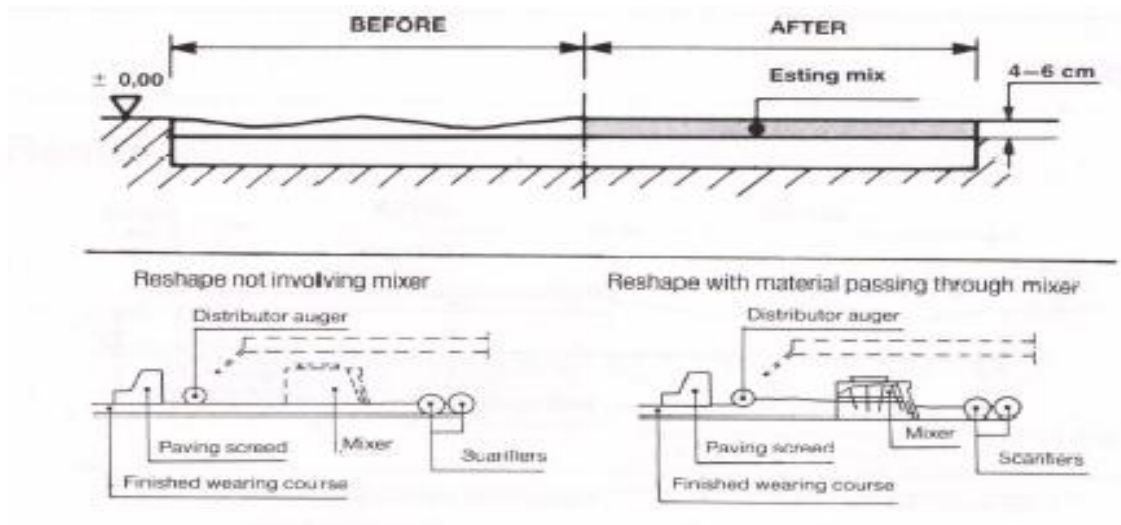


Figura 7.30 Método de reciclaje Re-formado (Reform).

*Arriba: Sección transversal de las superficies original y reciclada.
Abajo: Diagrama ilustrando el flujo de material y los componentes de la máquina cuando se re-forma.*

7.4.2.2 Repavimentado.

Cuando se repavimenta, el perfil de la superficie existente es restaurado, en una forma similar al método de re-formado y, al mismo tiempo, se aplica una capa de mezcla nueva adicionada; ambas capas son luego compactadas al mismo tiempo, Figura 7.31.

El método de repavimentado es usado para restaurar resistencia al deslizamiento, para rectificar roturas, modificar la pendiente del camino y reforzar el pavimento asfáltico.

Las características especiales del diseño del REMIXER, por ejemplo, un segundo tornillo sinfín de distribución y una segunda regla de nivelación pueden mejorar las propiedades de la mezcla re-colocada.

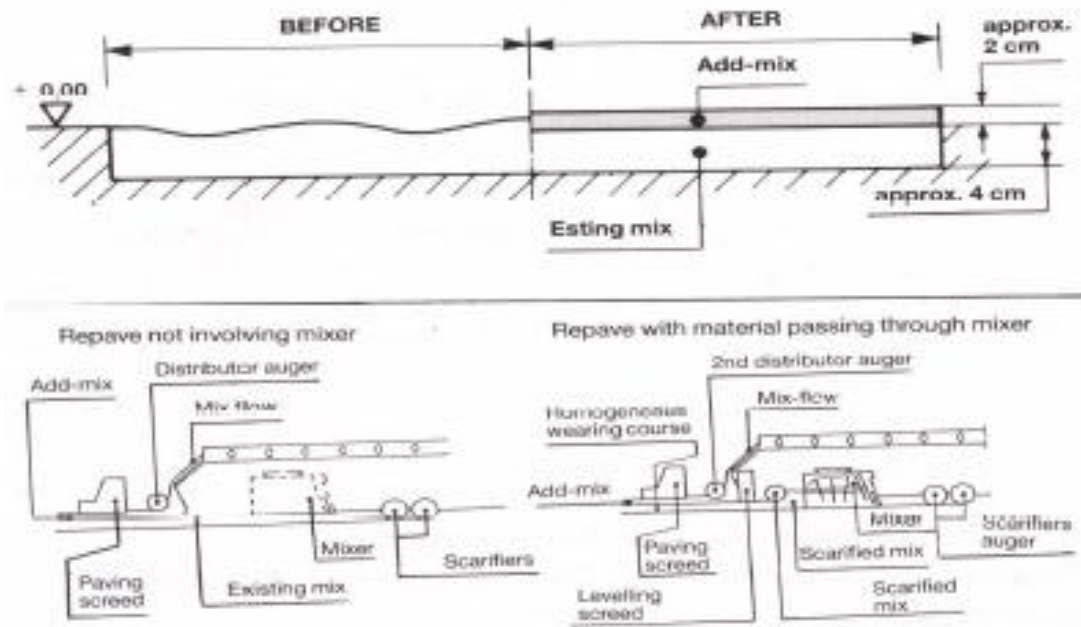


Figura 7.31 Método de reciclaje Repavimentado
 Arriba: Sección transversal de las superficies original y reciclada
 Abajo: Diagrama ilustrando el flujo de material y los componentes de la máquina cuando se repavimenta.

7.4.2.3 Re - mezclado.

Con el proceso de REMIX, las características del material del pavimento asfáltico existente son modificadas por la adición de una mezcla caliente virgen y/o un bituminoso, o un agente rejuvenecedor, para reestablecer las propiedades del asfalto.

El mezclador de dos ejes del REMIXER asegura un mezclado completo (o riguroso) de los materiales existente y nuevo.

Ej.: una mezcla homogénea se produce, y su calidad se compara con la mezcla caliente virgen.

El uso del método REMIX va desde la rehabilitación de una capa de desgaste vieja endurecida hasta la restauración de una capa de desgaste inestable. Estas capas pueden ser reforzadas al mismo tiempo, según sea necesario, figura 7.32.

No es necesario decir que la pendiente del camino puede ser alterada cuando se re-mezcla. También existe la posibilidad de modificar la capa de desgaste a una capa de liga para reforzar toda la estructura del camino, con la subsecuente sobre colocación de una nueva capa de desgaste.

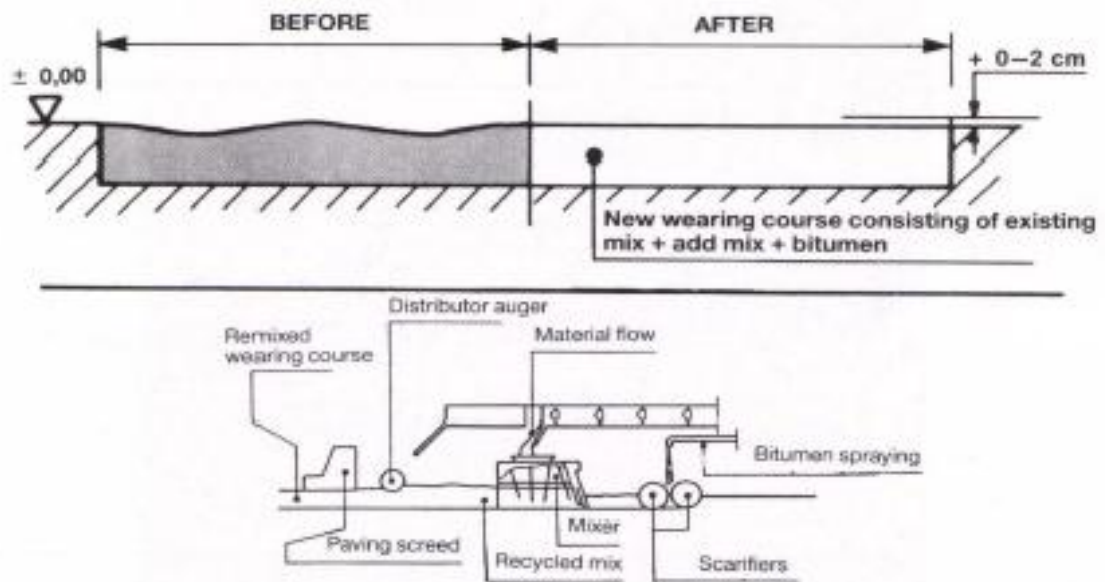


Figura 7.32 Método de reciclaje Re-mezclado (Remix).

*Arriba: Sección transversal de las superficies original y reciclada.
Abajo: Diagrama ilustrando el flujo de material y los componentes de la máquina cuando se re-mezcla.*

7.4.2.4 Re – mezclado plus.

Este método combina el re-mezclado estándar de la capa de desgaste, más la colocación de una nueva capa de desgaste encima, mostrado en la figura 7.33.

Las propiedades de la mezcla también pueden ser modificadas dispersando, previamente, agregado en la capa de desgaste que va a ser reciclada, por delante del REMIXER.

Otro beneficio es el ahorro de materia prima, a través de la capacidad de la máquina de colocar capas de desgaste delgadas, de alta calidad, encima de la capa ligante previamente reciclada (liga en caliente).

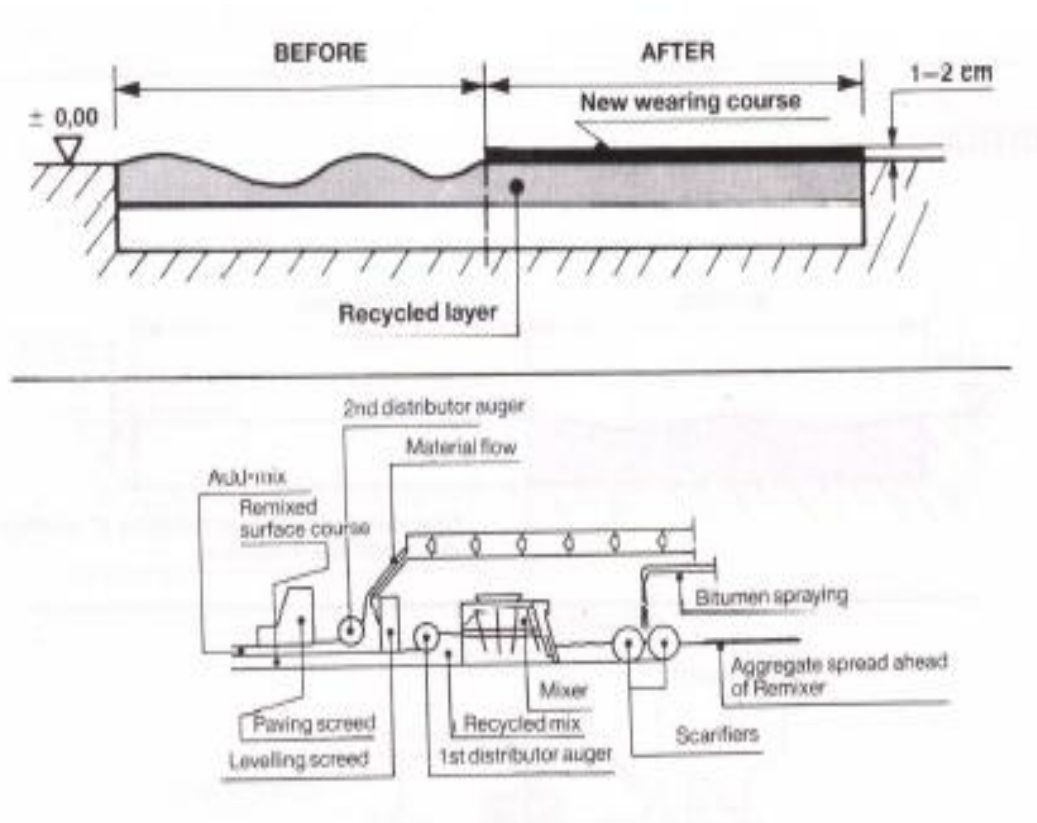


Figura 7.33 Método de reciclaje Re- mezclado Plus.

*Arriba: sección transversal de las superficies original y reciclada.
Abajo: diagrama ilustrando el flujo de material y los componentes de la máquina cuando se realiza el Re-mezclado Plus.*

7.4.3 Proceso constructivo del reciclaje en caliente de pavimentos flexibles.

7.4.3.1 Resumen.

Cumpliendo con lo expuesto en la sección 7.2 y 7.3.3 (Generalidades, trabajos preliminares al reciclaje, respectivamente) al pie de la letra se podrá dar inicio al proceso de reciclar una vía. En un breve resumen el proceso consta de los siguientes pasos:

- Este sistema consiste en la reconstrucción de la capa asfáltica (profundidad máxima 6.0 cm.) degradada mediante el uso de un precalentador y una máquina recicladora como la Remixer 4500. Aquí en nuestro país únicamente se utiliza la recicladora y los precalentadores que esta posee.
- Los precalentadores elevan la temperatura de la capa asfáltica hasta un rango entre 140 C ° a 170 C °, ablandándola. El objeto de tener una máquina encargada del precalentamiento de la carpeta asfáltica es forzar lo menos posible la escarificación que debe realizar la Remixer.
- El pavimento se remueve con unos escarificadores rotativos equipados con dientes de corte, hasta la profundidad requerida, determinada dependiendo el daño que desee corregirse en el pavimento.
- El escarificador puede ajustarse a varios anchos de trabajo y se regula exactamente la profundidad del material aflojado que luego se lleva por una banda transportadora al mezclador.
- La mezcladora consiste en dos ejes equipados con unos brazos o palas.

- Por la parte delantera llega el material recuperado a la mezcladora mientras la mezcla complementaria (si es necesaria) se añade desde la parte trasera de la maquina donde se ubica la tolva para el nuevo material.
- El material escarificado se revuelve con una mezcla adicional de corrección que contiene un agente ligante.
- El material corregido se lleva por una correa transportadora hasta el mezclador.
- Después de conseguir una condición homogénea. La mezcla se descarga a la vibro-terminadora, que la extiende.
- La superficie de colocación se calienta para garantizar una buena adherencia.
- La compactación final se realiza con compactadores como en cualquier pavimento asfáltico nuevo.

7.4.3.2 Operación del equipo y de los consumibles

Cualquier trabajo comienza con la selección del equipo y la organización del abastecimiento permanente de los consumibles en el sitio.

El equipo de reciclaje opera con aceite fuel, LPG y agua. Las capacidades de los tanques y el consumo promedio de las máquinas Remixer y los Precalentadores Wirtgen son mostradas en la tabla 7.1 y 7.2:

Tabla 7.1

Modelo de máquina WIRTGEN	Combustible (Diesel)		Gas Propano		Rejuvenecedor	
	Capacidad del tanque (Gal)	Consumo (Gal/h)	Capacidad del tanque (Gal)	Consumo (Gal/h)	Capacidad del tanque (Gal)	Consumo (Gal/h)
Precalentador 4500	33	≈ 2.37	≈ 1320	≈ 110	-	-
Remixer 4500	264	≈ 9.24	≈ 1100	≈ 89	≈ 369	-

Modelo de máquina WIRTGEN	Fuel		LPG	
	Capacidad del tanque (l)	Consumo (l/h)	Tanque/capacidad de botella (l)	Consumo (l/h)
Remixer 300	100	≈ 4	6 botellas a 33 kg = 370	≈ 30
Pre calentador 1000	100	≈ 7	8 botellas a 33 kg = 500	≈ 94
Remixer 1000	180	≈ 14	6 botellas a 33 kg = 370	≈ 62
Pre calentador 2500	150	≈ 8	≈ 2200	≈ 230
Remixer 2500	250	≈ 20	-	-
Pre calentador 4500	125	≈ 9	≈ 5000	≈ 420
Remixer 4500	750	≈ 35	≈ 4200	≈ 340

Tabla 7.2

El consumo de Diesel y agua de los rodillos puede ser obtenido de las instrucciones de operación relevantes o dependiendo de la producción diaria de la cual se tiene un conocimiento aproximado.

Preferiblemente, todos los consumibles deberían ser acopiados en la mañana, por ejemplo, antes de comenzar el trabajo. Los tanques del Remixer y de la Pre calentadora⁶¹ deben tener suficiente consumible para asegurar un día completo de trabajo sin interrupciones.

Por razones de seguridad, los tanques de gas no deben llenarse a menos que el equipo se haya enfriado completamente, por ejemplo de preferencia en la mañana.

⁶¹ En el país no se cuenta con la maquina Pre calentadora, únicamente se utilizan los pre calentadores que la Remixer posee.

7.4.3.3 Procedimientos en el sitio

La planeación del sitio está determinada por el ancho real del camino a ser reciclado, ya que es crítica para el planeamiento operacional, por ejemplo, los anchos de paso y de trabajo de máquinas individuales.

Se recomienda que el carril principal sea siempre reciclado en todo su ancho (las juntas longitudinales en el área real de tránsito deberían evitarse en todo momento).

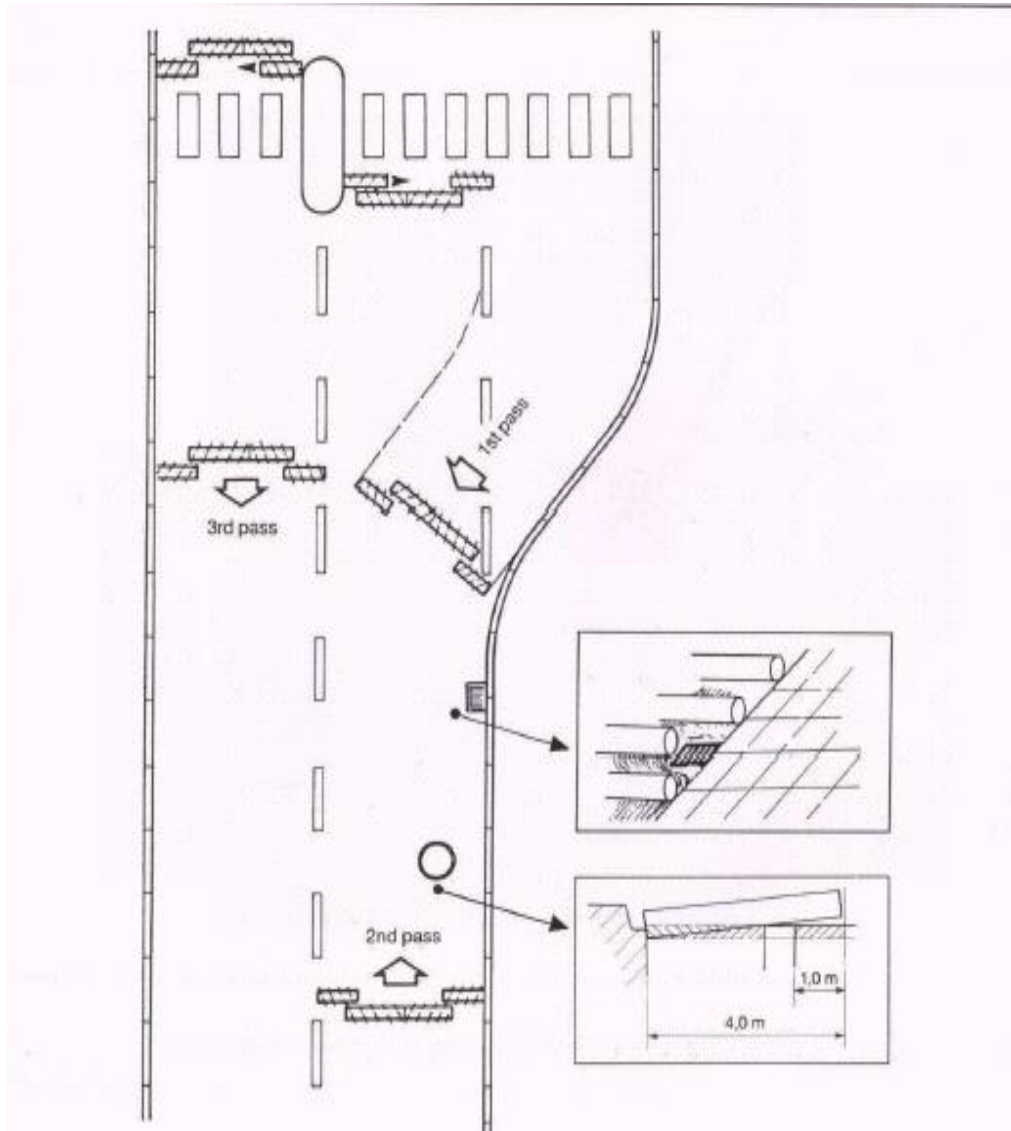
Cuando se encuentren desvíos, bahías de tráfico y/o islas de tráfico, es aquí donde las operaciones de reciclado deberían comenzar, ya que, en cualquiera de estos casos, parte del pavimento deberá ser procesado dos veces, ver Figura 7.34. Sin embargo, todos los aditivos (bituminoso y mezcla adicionada) son introducidos una sola vez.

Ya que el ancho de trabajo es infinitamente variable por medio de cilindros hidráulicos, las instalaciones de drenaje no presentan problemas durante la operación.

Las tapas de pozos, aunque son ajustables en altura, en muchos caminos nuevos, requieren normalmente especial atención. Dependiendo de su número, las tapas de pozo deben ser removidas, y los pozos rebajados y cubiertos temporalmente con placas de acero (por ejemplo, si se encuentran muchas tapaderas sobre la longitud del trabajo), o los escarificadores deben ser levantados cuando se encuentre cualquier tapa de pozo (por ejemplo, solo con un número limitado de tapaderas).

Consecuentemente, esto último dejará pequeños puntos no procesados por el Remixer.

Sin embargo, tales puntos son calentados y una mezcla reciclada es colocada por la plancha de tal manera que se logra un nivel uniforme en todo el pavimento.



Secuencia de pasos de máquina cuando se encuentran islas de tráfico, desvíos y/u hondonadas.

7.4.3.4 Abastecimiento de aditivos.

Los requerimientos diarios de aditivos dependen del desempeño proyectado por día. El rendimiento típico del REMIXER 4500 es de 4,000 m² á 6,000 m², dependiendo de los parámetros del sitio y las horas de trabajo reales.

Puede esperarse un velocidad promedio de máquina de 2.5 – 3 m/min.

Los requerimientos de aditivos (bituminoso, agente rejuvenecedor y mezcla adicional) pueden ser derivados de los resultados de ensayos preliminares (los cuales se trataron en el capítulo IV).

Basados en la velocidad de máquina y del rendimiento diario proyectado se puede estimar la cantidad de aditivos a ser suministrados. Cuando se va a adicionar una nueva mezcla, los requerimientos horarios deben ser calculados, basados en la velocidad de avance de la máquina, para coordinar los abastecimientos de la mezcla. Es importante el arribo en tiempo óptimo de los vehículos de abastecimiento de la mezcla, especialmente cuando se trabaja en caminos urbanos o en áreas bastante confinadas. Figuras 7.35 y 7.36 muestran la descarga de mezcla adicional en la tolva receptora del Remixer.



Figura 7.35 La mezcla adicional es cargada en la tolva receptora del Remixer. Durante el transporte al sitio, la mezcla es cubierta con una capota de lona para prevenir un excesivo enfriamiento.



Figura 7.36 Descarga de mezcla adicional en el proyecto de reciclaje en carretera Los Chorros⁶².

Para asegurar una transición suave entre el pavimento reciclado y el carril existente, en el comienzo de la operación, es imperativo que algo de la nueva mezcla adicionada sea transportada directamente a la plancha, como en el repavimentado.

Sin embargo, si la granulometría y el contenido de bituminoso de la nueva mezcla es demasiado diferente del diseño de mezcla final, por ejemplo, no se puede considerar el uso de mezcla adicionada solamente, es recomendable suministrar, con la primera carga de camión, 2 - 3 toneladas de mezcla con la misma consistencia de la mezcla final. Esto aportará suficiente mezcla al frente de la plancha, para llenar el espacio antes de que esté disponible la mezcla reciclada completamente.

⁶² Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador.

Si esto es impracticable, la mezcla adicionada debe ser introducida directamente en el mezclador, que resulta en una ligera diferencia en la proporción de mezcla sobre los primeros, digamos, tres metros.

7.4.3.5 Control del tráfico.

Las regulaciones del control del tráfico junto, con los sitios de trabajo, varían de país a país. Ver Figura 7.37 y 7.38.

Una característica del método de reciclado en el lugar es la progresiva terminación del sitio de trabajo, con requisitos de control de tráfico menos severos, comparados con los sitios de trabajo convencionales.



Figura 7.37 Un sitio progresando continuamente en una carretera rápida – el control del tráfico es por una barrera de postes.



Figura 7.38 Se muestra como se utilizó únicamente el carril a ser reciclado en la carretera hacia Los Chorros, obstaculizando lo menos posible al tráfico, se colocó señales de advertencia y conos de precaución.

7.4.3.6 Comienzo de operaciones con el tren de reciclaje

Cuando el tren de reciclaje está ubicado ya en la carretera a ser reciclada, el proceso que debe seguirse se muestran a continuación:

Un camión con mezcla adicional debe ir al frente, por si el pavimento a ser reciclado posee imperfecciones como baches (si no se han reparado con anterioridad) que deben ser reparados antes de proceder al reciclaje, cuando no se posee una máquina Precalentadora, pero por el contrario si solo se cuenta con la Remixer (como en nuestro país) iría una Precalentadora antes que el camión, como se muestra en la figura 7.39.

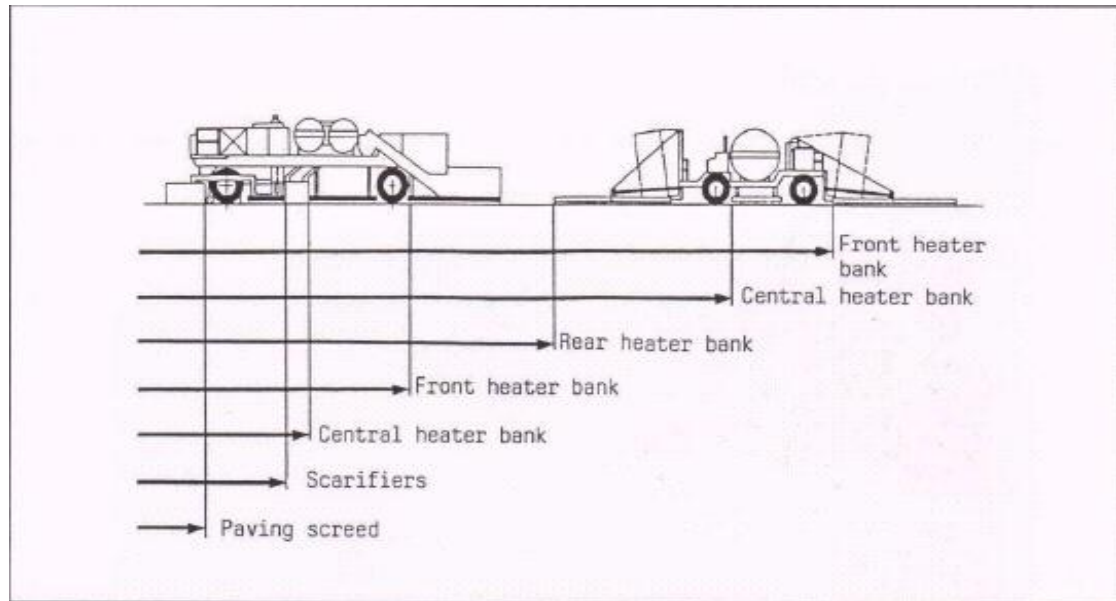


Figura 7.39

En el esquema se muestra la máquina Precalentadora y luego la Remixer, pero para nuestro caso solo suceden los pasos que realiza la Remixer.

El banco calentador frontal del Precalentador es colocado sobre el carril a ser reciclado, y su posición inicial será la futura junta transversal al pavimento existente.

Los quemadores son encendidos, y el Precalentador lentamente comienza a moverse después de un corto tiempo de espera.

Cuando los otros bancos calentadores (central y trasero) pasan la posición de inicio, los quemadores son encendidos.

Después de un calentamiento suficiente del pavimento por el Precalentador, el Remixer es colocado con el banco calentador central (localizado debajo de la tolva receptora) en la posición de inicio. La mezcla adicionada es descargada en la tolva receptora del Remixer.

El calentamiento final de la superficie del asfalto es efectuado por los bancos del

Remixer (ver figura 7.40), y el procedimiento para el encendido de los quemadores es el mismo que se describe para el Precalentador.



Figura 7.40 Muestra el calentamiento final de la superficie del pavimento realizado en el reciclaje de la carretera hacia Los Chorros⁶³.

Los escarificadores son bajados justo en la posición de inicio donde el molido comienza; la profundidad de trabajo es establecida y ajustada por medio del sistema de control de nivelado.

Cuando se va a agregar bituminoso o agente rejuvenecedor, el sistema de rociado es establecido y activado.

Pasada la posición de inicio, la mezcla adicionada es transferida al mezclador, o a la plancha, por medio de la banda transportadora

La proporción RAP-mezcla adicionada es fijada.

⁶³ Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Publicas de El Salvador.

Pasada la posición de inicio, la plancha es fijada (en términos de pendiente, espesor de pavimento y compactación), y el control automático de nivelación es activado.

El tren de reciclaje puede ahora comenzar a operar a la velocidad predeterminada, como se muestra en la figura 7.41.



Figura 7.41 Comienzo de operación. El Precalentador ha comenzado a trabajar mientras el camión con la mezcla adicional, el Remixer y el rodillo están esperando, listos para empezar.

7.4.3.7 Pasos operacionales.

La velocidad de la máquina depende de la temperatura del asfalto reclamado, de la potencia de la máquina y el espesor a reciclar.

Puede esperarse una velocidad promedio de máquina de 2.5 – 3 m/min. Ya que es con la que se ha trabajado en el país.

7.4.3.8 Calentamiento de la superficie.

La penetración del calor puede ser afectada por lo siguiente: temperatura ambiente, temperatura del pavimento, velocidad y dirección del viento, así como la humedad de la superficie y el agua retenida en la mezcla.

Estos factores, los cuales pueden cambiar a lo largo del trabajo, son proporcionados por características especiales del Remixer.

- Presión de gas variable para incrementar/reducir la aplicación de calor;
- Bancos calentadores de altura ajustable (ver figura 7.42), ya sea para intensificar el calentamiento de la superficie, o para permitir que cualquier agua evaporada escape rápidamente del pavimento húmedo;
- La presión de gas de las secciones individuales de bancos calentadores puede ser regulada para contrarrestar la dirección del viento. Figura 7.43.

Las anteriores características dirigidas a un calentamiento uniforme del pavimento facilitan un desempeño óptimo todo el tiempo. Figura 7.44.

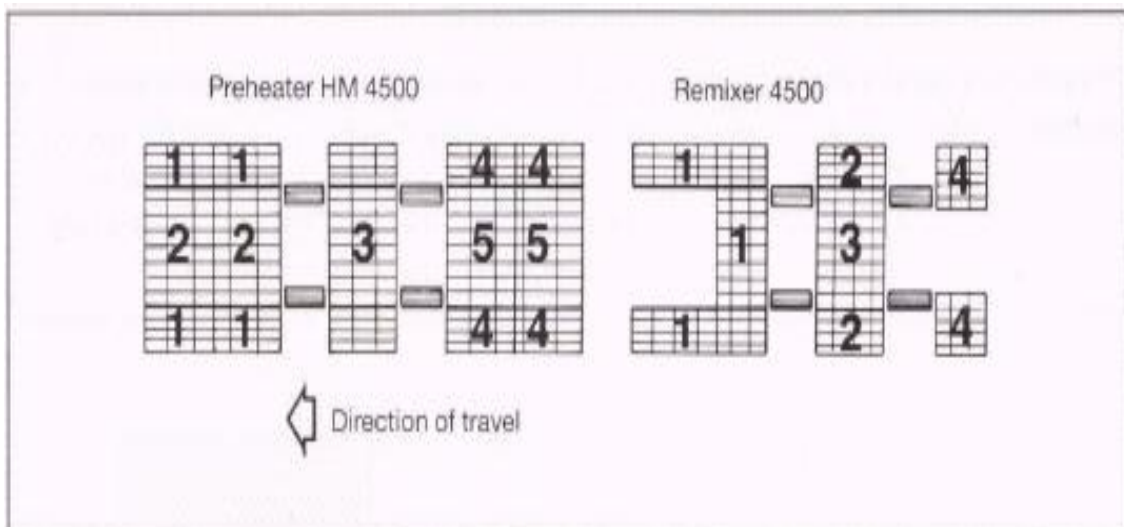


Figura 7.42 Bancos calentadores con secciones controladas individualmente. El ancho de trabajo es variable, asegurando que el calentamiento traslape las juntas.

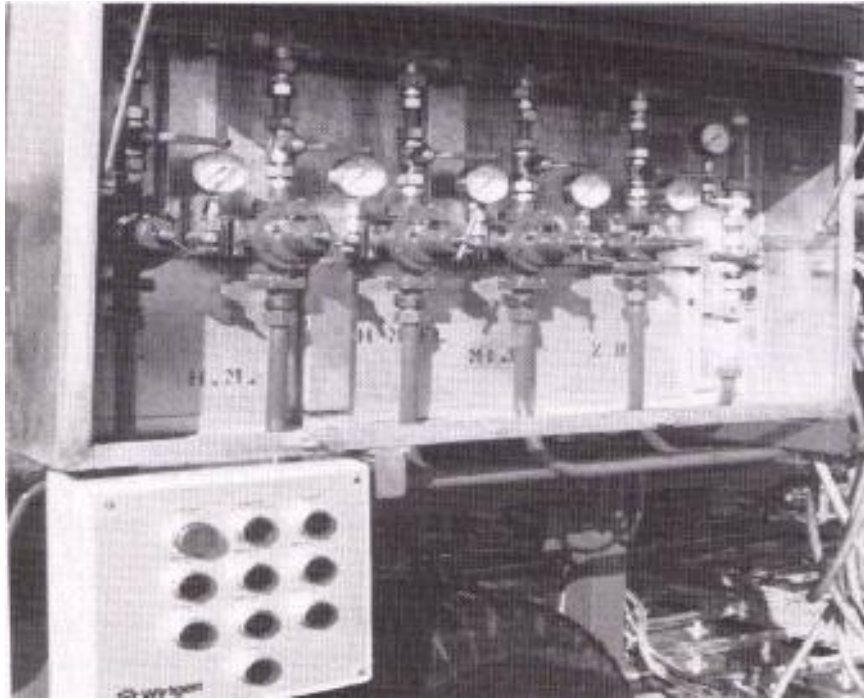


Figura 7.43 Estación de control de presión de gas para regular la salida de calor de las secciones individuales de bancos calentadores.



Figura 7.44 Bancos calentadores de la Remixer. Por ser de noche se logran ver encendidos⁶⁴.

⁶⁴ Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Publicas de El Salvador.

La temperatura del material reclamado es un factor crítico en el proceso de remezclado.

La salida de calor no puede ser incrementada infinitamente, ya que un exceso de calor dañará la plasticidad y las propiedades del bituminoso contenido en el asfalto.

La temperatura de la superficie puede ser controlada efectivamente por medio de la presión de gas variable, la liberación del banco de calentadores y la velocidad hacia delante, y la temperatura de la mezcla en la plancha debe ser controlada continuamente.

Cuando la nueva mezcla es adicionada, y dependiendo de su cantidad, la temperatura de la mezcla final es afectada. La siguiente gráfica (figura 7.45) muestra las temperaturas alcanzadas durante el calentamiento, la penetración del calor y la temperatura de la mezcla final.

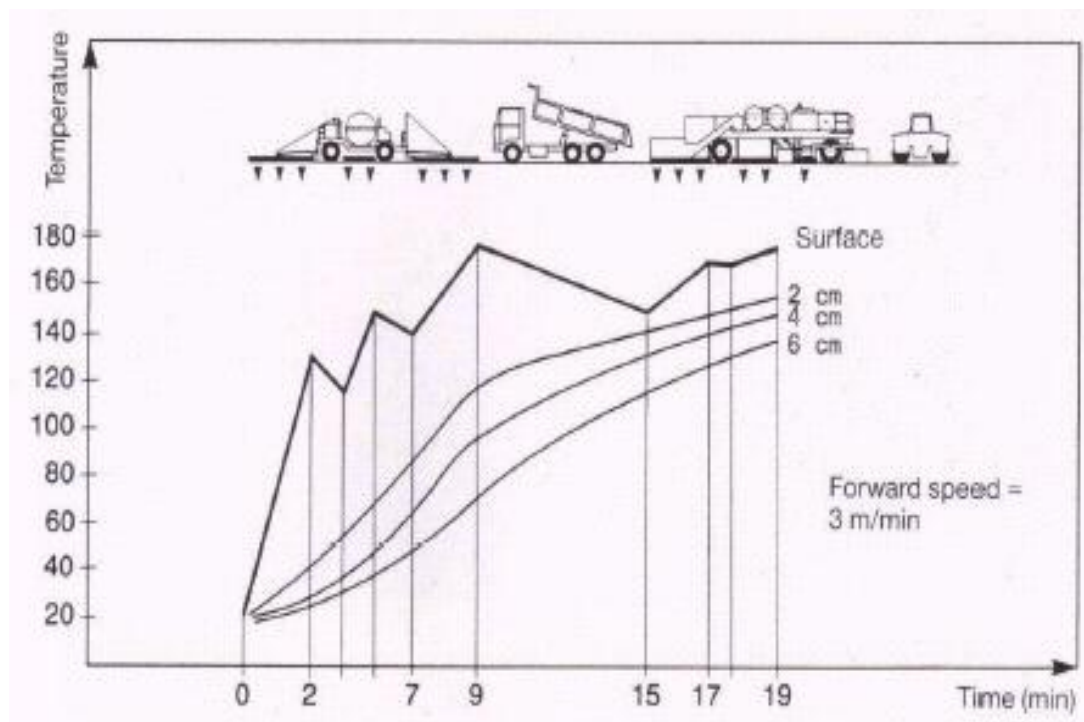


Figura 7.45 Curva típica de temperatura cuando se calienta/remezcla

7.4.3.9 Escarificación.

Los escarificadores rotan en un modo de molido hacia abajo. El arreglo helicoidal de las herramientas de corte asegura un excelente mezclado, homogeneidad y temperatura uniforme durante la escarificación, el escarificador es mostrado en la figura 7.46 y 7.47. Cuando se re-forma o se repavimenta, la temperatura de la mezcla escarificada es suficiente para asegurar una óptima re-compactación.

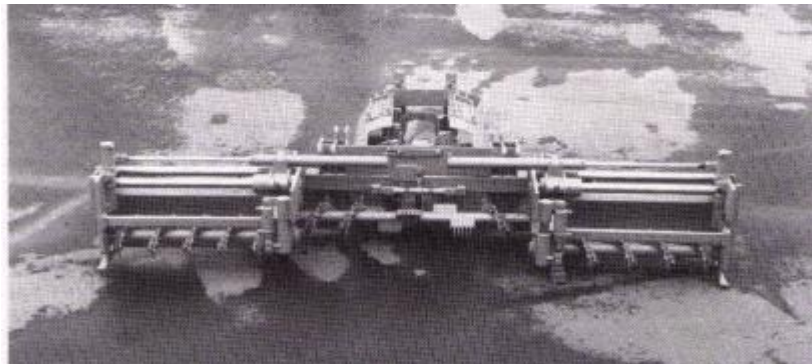


Figura 7.46 *Ensamblaje de escarificador variable con ejes rotatorios para escarificar el pavimento de asfalto calentado sin degradación del agregado.*



Figura 7.47 *Remixer 4500 realizando la escarificación del pavimento en la carretera hacia Los Chorros.*

Cualquier “rodeo” de hondonadas y/o islas de tráfico, si es necesario es efectuado por medio de paneles de control separados localizados en los ejes escarificadores extensibles (ver figura 7.48). Estos ajustes del ancho de trabajo no afectarán o discontinuarán la operación de la máquina.



Figura 7. 48 Panel de control para secciones extensibles de escarificador

7.4.3.10 Adición del bituminoso

Cuando se va adicionar betumen o agente rejuvenecedor, éste es rociado sobre los ejes del escarificador rotativo. El sistema de rociado esta en relación a la velocidad de avance de la máquina, y la cantidad a ser adicionada es establecida en litros por minuto, este sistema es mostrado en la figura 7.49.

El volumen a ser adicionado es controlado electrónicamente. Ver figura 7.50.

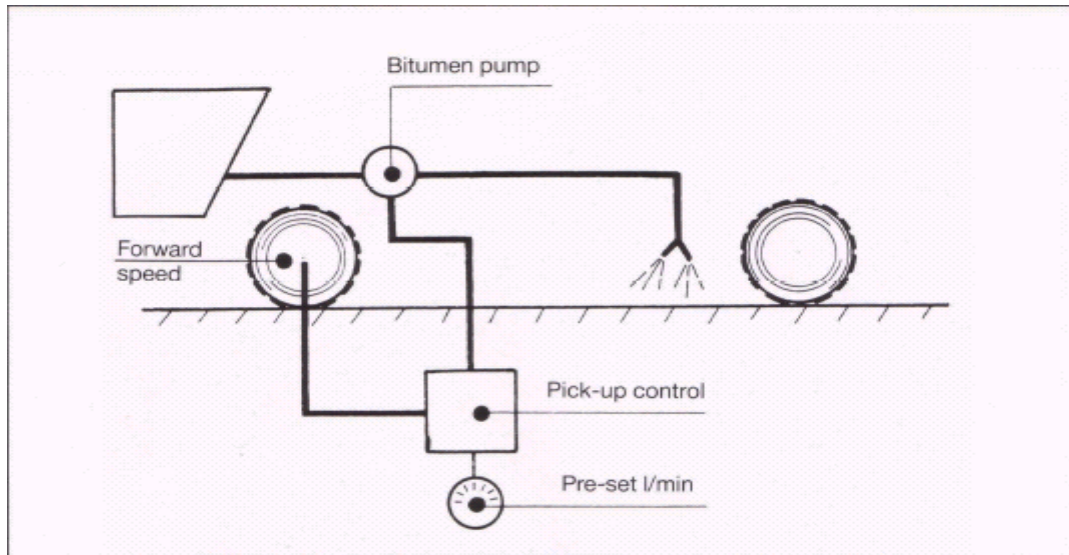


Figura 7.49 Representación diagramática del sistema de rociado del bituminoso de la Remixer 4500

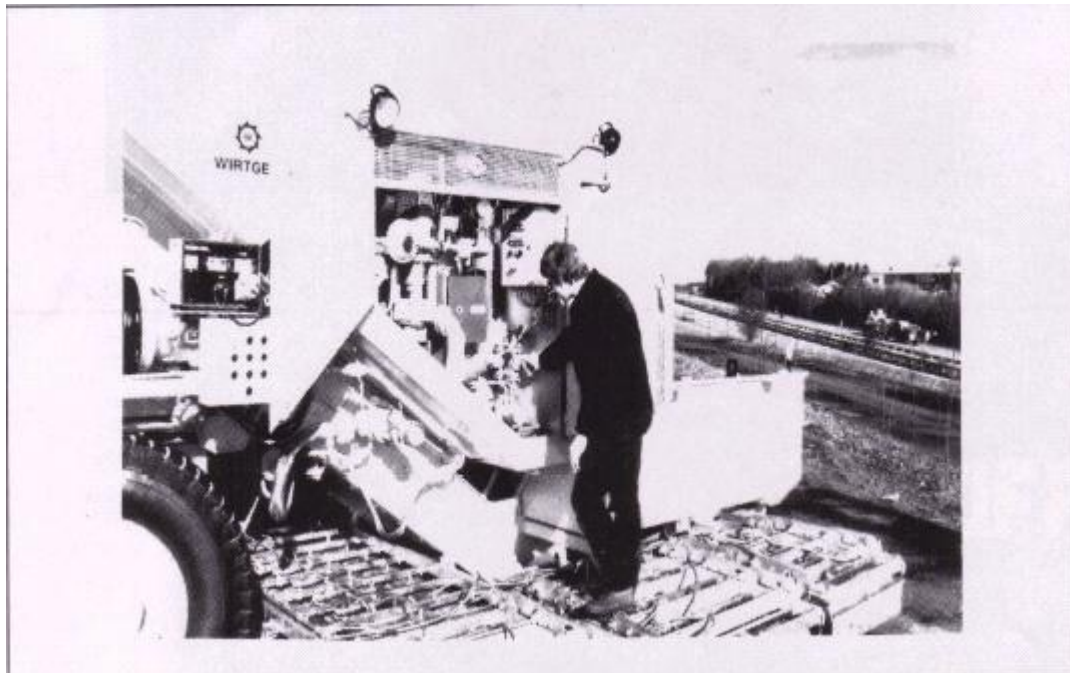


Figura 7.50 Sistema de bituminoso calentado con aceite caliente con control totalmente automático⁶⁵.

⁶⁵ Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Publicas de El Salvador.

7.4.3.11 Reclamo del material escarificado.

El raspador atrás del escarificador variable rotatorio cumple un número de funciones diferentes, por ejemplo, cuando se re-forma o se repavimenta, nivela y perfila la mezcla escarificada; cuando se remezcla, forma la placa posterior de la cámara escarificadora, asegurando una completa remoción del material y el transporte de la RAP al mezclador de dos ejes.

7.4.3.12 Mezclado.

El mezclador de dos ejes tiene 2 metros de longitud, y está equipado con ejes mezcladores contra-rotatorios (ver figura 7.51), para garantizar una mezcla excelente y homogénea de la mezcla escarificada con la nueva mezcla y el bituminoso.

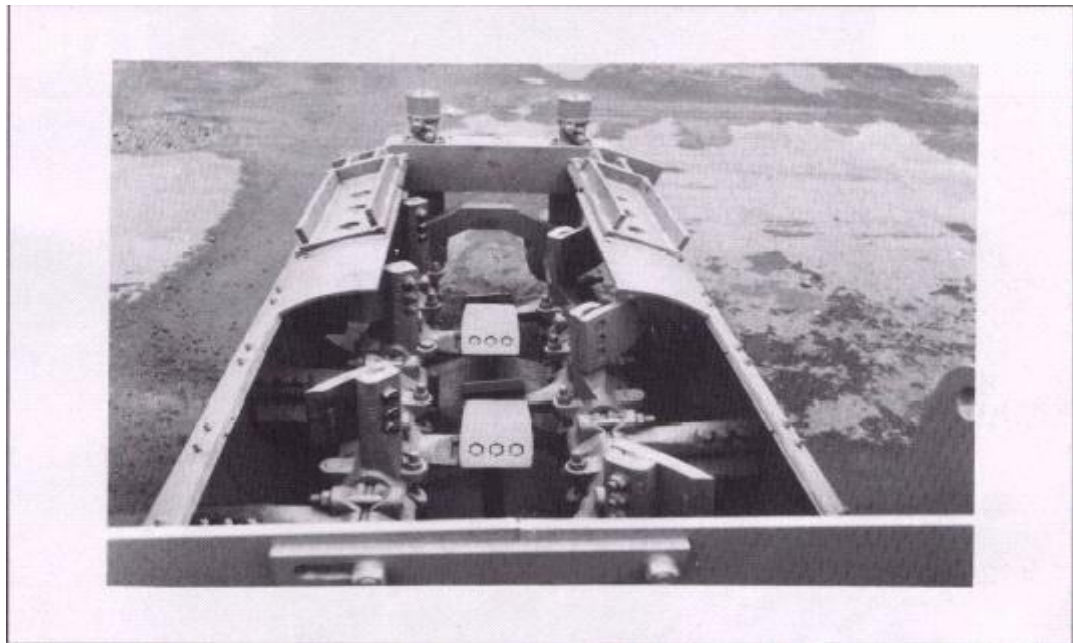


Figura 7.51 *Mezclador con ejes contra-rotatorios*

7.4.3.13 Adición de la nueva mezcla.

La nueva mezcla es transferida de la tolva receptora a la tolva proporcionadora por medio de un transportador inclinado. La cantidad de mezcla adicionada prefijada es luego medida y llevada al mezclador por medio del transportador del chasis, como se muestra en la figura 7.52.

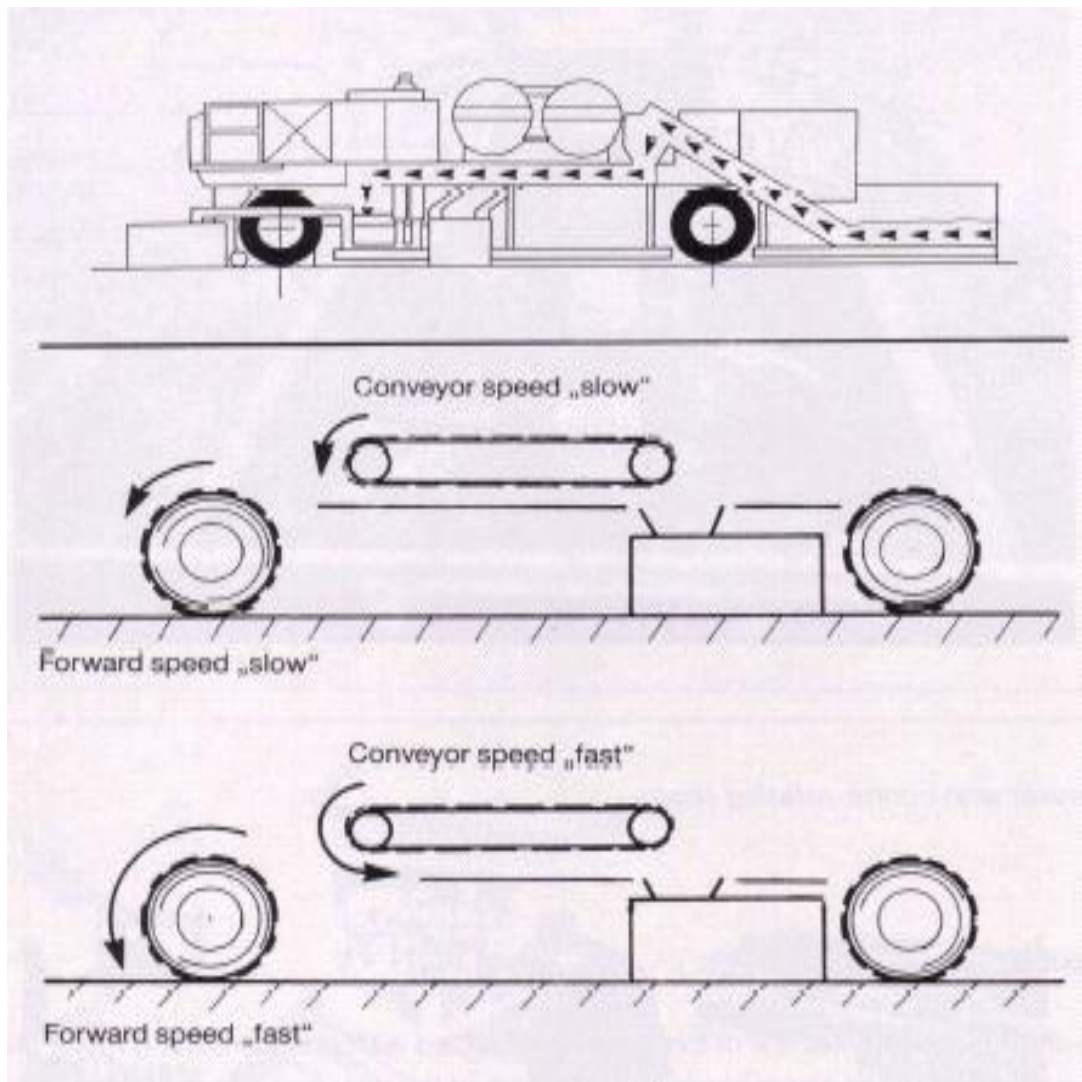


Figura 7.52 Representación diagramática del flujo de la mezcla adicionada y del control de la mezcla adicionada dentro del Remixer.

La velocidad del transportador es controlada electrónicamente por la velocidad de avance, por ejemplo, la cantidad de mezcla adicionada (velocidad del transportador) es prefijada en los controles los cuales automáticamente ajustan la velocidad del transportador y del flujo del material de acuerdo con la velocidad de la máquina.

La mezcla final es descargada del mezclador en un cordón, y esparcida uniformemente sobre la superficie calentada por medio del tornillo sinfín. Figura 7.53.

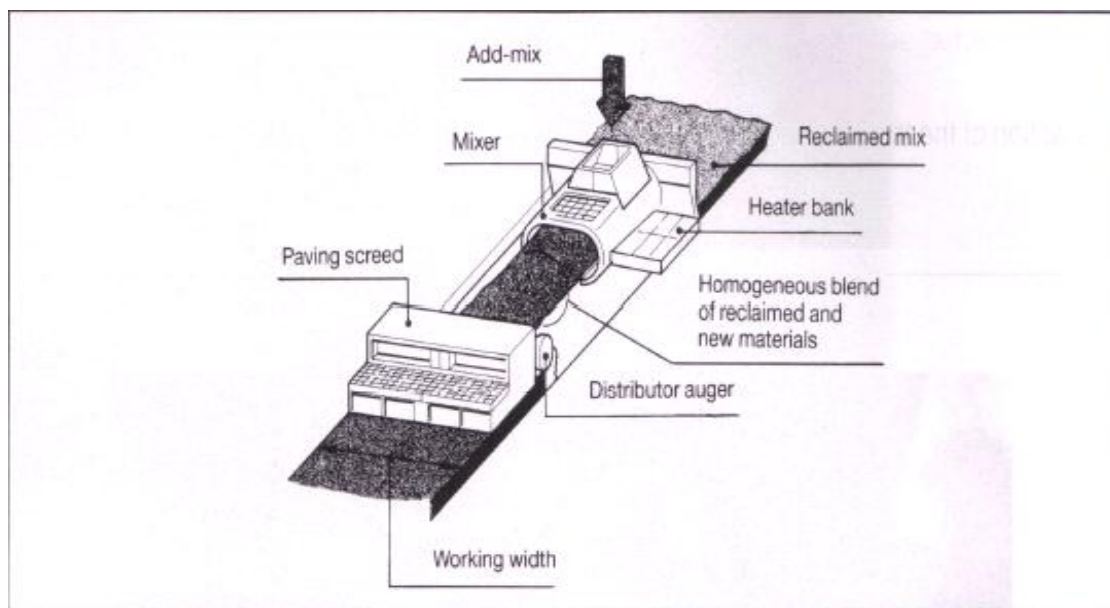


Figura 7.53 Representación diagramática del flujo de material⁶⁶.

7.4.3.14 Calentamiento de la superficie escarificada.

La superficie de la “sub-base asfáltica” que recibirá la capa de mezcla reciclada es calentada por banco de calentadores separado con quemadores infrarrojos, para asegurar una liga caliente perfecta y durable. Ver figura 7.54.

⁶⁶ Fotografías proporcionadas por la UIDV del Ministerio de Obras Publicas de El Salvador.

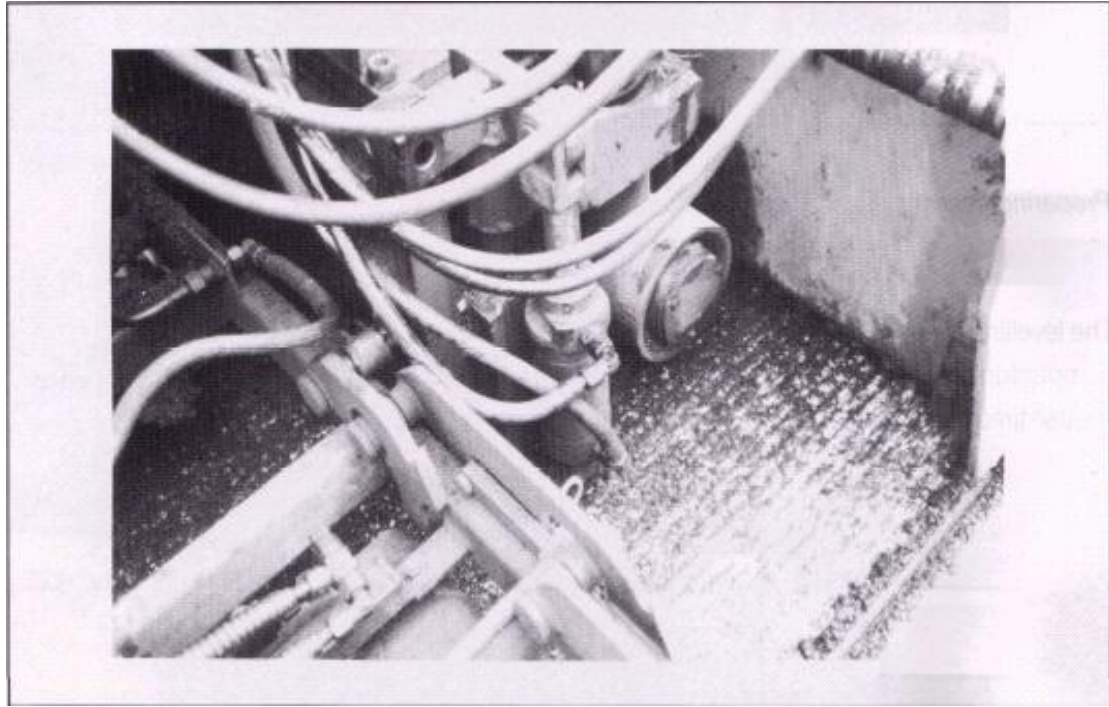


Figura 7.54 Textura de la superficie después de la escarificación y la remoción de la mezcla existente para el subsecuente calentamiento y liga en caliente.

7.4.3.15 Colocación de la mezcla con la plancha vibratoria

La nivelación de la plancha “flotante” puede ser manual o automática.

La Remixer ya consta con esta plancha que prácticamente deja la carpeta asfáltica lista para su compactación. Ver figura 7.55 y 7.56.

Una pre-compactación óptima asegura el grado y la pendiente correcta del nuevo pavimento, después de la compactación final por un rodillo con llantas de goma, rodillo estático o una combinación de llantas de goma/acero y un rodillo vibratorio estático.



Figura 7.55 Se puede observar la capa ya nivelada como lo deja la máquina Remixer 4500 propiedad del MOP.



Figura 7.56 Pavimento listo para la compactación final. Luego que ha pasado la Remixer, se puede observar que el pavimento esta caliente por la existencia de vapor. Estas fotografías fueron tomadas de un tramo de la carretera hacia Los Chorros.

7.4.3.16 Compactación de rodillo.

Luego de que la REMIXER 4500 termine de colocar la carpeta asfáltica ya reciclada, se procede a la respectiva compactación.

La capa asfáltica pre-compactada es compactada finalmente con rodillos, como se usa en trabajos de rehabilitación convencionales. Figura 7.57.

La compactación se realiza con un compactador de rodillo vibratorio, hasta llegar a la densidad requerida por el control de calidad y luego se sellara la superficie con el compactador “llanta de hule”. Los equipos se muestran en la figura 7.58:



Figura 7.57 Compactación final de la capa de desgaste reciclada

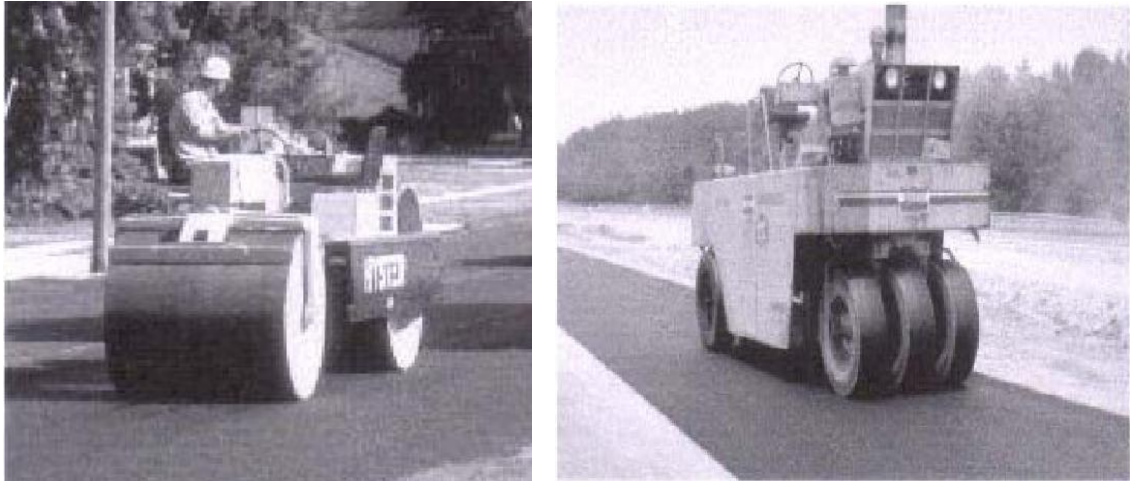


Figura 7.58 Rodillo vibratorio y Rodillo llanta de hule o neumático

7.4.3.17 Procedimiento de rodillo.

Compactación recomendada:

- Los rodillos deben viajar justo detrás de la máquina Remixer, cuando la temperatura de la mezcla aún es suficientemente alta para asegurar una rápida compactación.
- Las juntas deben ser compactadas primero. Una liga perfecta y durable sólo es posible con un material caliente.
- Cuando se compacten pendientes, comience siempre al fondo del pavimento reciclado. En otras palabras, el rodillo está siempre hacia arriba de la pendiente.
- La vibración del rodillo debe ser suspendida antes de cambiar la dirección de viaje ya que de otra manera se dejan “marcas de compactación” las cuales son difíciles de remover.

- La velocidad del rodillo debe ser alterada gradualmente en todo momento para prevenir “empujar” la capa de asfalto.
- El viaje hacia delante y hacia atrás debe ser en la misma pasada del rodillo.
- El cambio de dirección en un pavimento “caliente” causará distorsiones y agrietamientos.
- El maniobrar a la próxima pasada el rodillo debe hacerse sólo en un asfalto enfriado para eliminar grietas y empuje.
- Las pasadas de rodillo deben ser paralelas y traslapadas por aproximadamente 10 cm. Nunca cambie la dirección del viaje en carriles compactados previamente.
- Asegure un abastecimiento adecuado de agua a las llantas del rodillo.
- Nunca estacione el rodillo sobre un pavimento caliente.

7.4.3.18 Reabriendo el camino al tráfico.

Después del rodillo, la temperatura del pavimento asfáltico normalmente ha caído por debajo de los 80° C. Esta temperatura permitirá que pase de manera fluida el tráfico, sin daño a la estructura de la nueva capa.

Sin embargo, como una regla, al pavimento nuevo debe dársele tiempo para enfriarse por debajo de 50° C antes de abrir el tráfico. Dependiendo del espesor de la capa, y considerando temperatura ambiente normal, el período de enfriamiento no debería tomar más de 2 horas. Ver figura 7.59.



Figura 7.59 El camino terminado.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y

RECOMENDADACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Luego de haber realizado una extensa investigación acerca de los Métodos de Reciclaje de Pavimentos Flexibles, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

1. Existen varias razones por las cuales se puede incorporar material nuevo en el proceso de reciclaje:
 - Cuando se trata de pavimentos viejos en los cuales su vida útil ya se ha cumplido, se puede notar que como parte de las obras de mantenimiento (bacheo o recarpeteo) se han incorporado materiales que han modificado la granulometría original de la mezcla asfáltica, base o subbase del pavimento requiriéndose agregar material nuevo para compensar la granulometría y hacer entonces que entre a rangos especificados.
 - Para reponer el material que se halla perdido por los daños sufridos en el pavimento debido a las cargas de los vehículos y el clima.
 - Mejoramiento o modificación de la rasante proyectada.

2. Durante el proceso constructivo, el hecho de realizar un tramo de prueba antes de iniciar el reciclaje es de mucha importancia debido a que se pueden establecer los lineamientos a seguir durante el proceso constructivo para cumplir con las especificaciones técnicas del proyecto. Algunos aspectos a considerar de la ejecución del tramo de prueba son:

- El buen funcionamiento de la maquinaria
 - Número de pasadas con el equipo compactador para lograr la compactación especificada.
 - Longitud del tramo a reciclar durante todo el proceso de rehabilitación considerando el tiempo del que se dispone para escarificar, mezclar y compactar sin que el agente estabilizador pierda sus propiedades.
 - Espesores conseguidos al compactar.
3. En el diseño de la estructura del pavimento con bases estabilizadas siempre se esta expuesto a agrietamientos por contracción del material por esto es necesario colocar carpetas asfálticas divididas en subcarpetas; una subcarpeta base de mezcla abierta para absorber estos pequeños agrietamientos y una subcarpeta de rodadura para el confort del tráfico. Otra alternativa para el manejo de tal situación es el uso de material geosintético.
 4. De acuerdo a la investigación realizada se logró determinar que los estudios previos que se hacen a los pavimentos flexibles para determinar si conviene usar la técnica de rehabilitación de reciclaje de pavimentos, son los mismos que se le hacen a cualquier vía que quiere rehabilitarse, además que la técnica se realiza en un tiempo relativamente corto y sin molestias mayores al tráfico.
 5. Se comprobó que en el país se conocen estas técnicas y se están poniendo en práctica en distintos puntos del país, además que se realizan los estudios previos al pavimento para someterlo a rehabilitación y que no se usa la técnica al azar.

6. La compactación de una vía rehabilitada por el método del reciclaje no presenta cambios en el proceso. Debe tenerse el mismo cuidado como si se tratara de una nueva carretera.
7. Las técnicas de reciclaje de pavimentos pueden ser supervisadas eficientemente por controles de calidad tanto al momento de correcciones en la mezcla extraída como al momento de colocar la nueva mezcla.
8. Se logró constatar que se cuenta con especificaciones técnicas para la aplicación del reciclado de pavimentos, están contenidas en las especificaciones SIECA, secciones 403 y 416. En estas se establecen recomendaciones sobre el uso de las técnicas de reciclaje de pavimentos, la toma de muestras y las pruebas de laboratorio que se deben realizar para el control de calidad de estos procesos constructivos.
9. La técnica del reciclado en frío es aplicable, cuando el pavimento existente presenta daños que ya han llegado a la base y se determina que es necesario una restauración del pavimento. Siempre debe considerarse que cuando se trate de pavimentos muy viejos podría darse el caso que la base este conformada por material muy grande como piedra cuarta (macadán) entonces la técnica de reciclaje en frío no podría ser aplicable ya que a pesar de la potencia de la maquinaria utilizada en este proceso podría resultar muy difícil y antieconómico la actividad de fracturar materiales para obtener una granulometría que garantice un comportamiento satisfactorio en el producto terminado.

10. La técnica del reciclaje en frío es aplicable a proyectos a largo plazo, ya que puede mejorar el número estructural del pavimento y es una alternativa que como se estableció en el desarrollo del documento se pueden reciclar profundidades mayores a los 15cm y siempre colocando una carpeta nueva sobre la base reciclada formando así una nueva estructura del pavimento. Para este fin resulta imprescindible realizar inspecciones previas al inicio del proceso en áreas que se van a reciclar ya que pueden existir daños que requieran la incorporación de material nuevo (baches o donde el pavimento, debido a la falta de confinamiento lateral, haya perdido agregados provocando así el acomodo de agua que no solo este afectando la base sino también la subbase que muchas veces esta conformada de material fino y plástico siendo necesario entonces un tratamiento especial que incluya la restitución de toda el área y espesor afectado).

11. La granulometría de los agregados del pavimento existente desempeña un rol sumamente importante, ya que en base a ello se determina el tipo y el porcentaje de agente estabilizador que se va a utilizar en el proceso constructivo, por esa razón se debe corroborar que la granulometría sea la misma a lo largo de la longitud del proyecto, considerando que sí la granulometría es variada, así serán los resultados obtenidos en el tramo o carretera reciclada.

12. Por medio del diseño de espesores en el reciclaje en frío se demostró que no solo se puede usar el cemento como estabilizante en la base, sino que el espesor puede reducirse también utilizando como estabilizante las emulsiones asfálticas.

13. La técnica de reciclaje en caliente es aplicable si los daños solo han afectado la carpeta asfáltica ya que en caso contrario, está no aplica debido a que no podrá superar los problemas o fallas de base, por lo tanto los resultados obtenidos del pavimento rehabilitado, no serán los esperados. El reciclado en caliente únicamente mejora el confort de la vía, es tal que el usuario no experimenta la junta transversal entre el pavimento rehabilitado y el que no necesita rehabilitación.
14. Existen diferentes tipos de reciclado en caliente como: el método de re-formado, método de re-pavimentado, método de re-mezclado plus, no obstante en nuestro país solo se ha utilizado el método de re-mezclado. Usando estos métodos la vía mejora la resistencia al desgaste, al deslizamiento y se vuelven más resistentes a los cambios climáticos, pero son aplicables únicamente si el asfalto que contiene el pavimento puede rejuvenecerse aún.
15. Usando la técnica de reciclaje en caliente se logra conservar el nivel del pavimento actual, además se puede mejorar la pendiente de éste en un pequeño porcentaje y mejorar así el drenaje. El rehabilitar una carretera usando esta técnica resulta más económico que otros métodos debido a que no se utiliza mucho personal al momento de realizarlo y se ocupa un 100% del material existente a colocar, además que ayuda a conservar el medio ambiente ya que necesita una cantidad pequeña de materiales viales nuevos (algunas veces) y

rejuvenecedor para realizar correcciones y volver al pavimento a sus propiedades originales.

16. Como característica de la recicladora en caliente Remixer 4500 mencionaremos que: puede prescindir del uso de otros equipos, ya que está tritura el pavimento, corrige sus propiedades, lo mezcla y lo coloca uniformemente dejándolo listo para su compactación.

8.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda profundizar en el tema de las emulsiones asfálticas, como el uso de ellas reduce los espesores a reciclar y aumentan las resistencias que alcanzan los materiales estabilizados sin llegar a los agrietamientos, son experiencias que se viven en Países de Sur América y África donde el uso de emulsiones asfálticas o mezclas de asfalto espumado con cemento, han llevado a obtener excelentes resultados en el reciclaje de pavimentos, por lo que se considera importante conocer acerca de su uso y poderlas aplicar en nuestros País.
2. Realizar pruebas para determinar el M_R , el CBR y otros datos que se deben conocer para lo que es el diseño de espesores de pavimentos y así pueda desarrollarse una investigación que incluya estos puntos así como la obtención de

información recopilada de tráfico a través de conteos que pudiera servir como respaldo para elaborar un tramo de prueba en el reciclaje de una vía.

3. Investigar sobre los aspectos que han provocado que existan fallas en los proyectos de reciclaje de pavimentos realizados en nuestro país.

4. Se recomienda investigar sobre el grado de envejecimiento máximo que puede tener un asfalto hasta el cual es aplicable la técnica de reciclaje en caliente.

5. Considerando que existen varios tipos de asfalto, se recomienda investigar sobre los usos de estos en los procesos de reciclaje tanto en frío como en caliente.

8.3 BIBLIOGRAFIA.

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Official. USA. 1993
2. ASIA. Seminario "Cuarto Congreso de Vías Terrestres", San Salvador. Noviembre 2002
3. Cañas Muller, Manuel Edgardo "Estudio Técnico Económico sobre El Método de Reciclaje de Pavimentos Asfálticos en Vías Urbanas y Carreteras". Tesis UES.1990
4. Instituto Americano del Asfalto. "MS-1 Thickness Design Asphalt Pavement for Highway & Streets". Ninth Edition of the Institutes Thickness Desing Manual. USA. febreary 1991
5. Osorio Gómez, Alvarino. "Métodos para Calcular Espesores de Pavimentos Flexibles". Tesis UES. 1966
6. Estabilización de Explanadas y reciclado in situ de firmes con cemento, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Salamanca, España, Octubre 2001.
7. Manual de Reciclaje en Frío Wirtgen, Wirtgen GMBH. Segunda edición revisada, septiembre 2001.
8. Asphalt Cold-mix Recycling, The Asphalt Institute, serie del manual No. 21 (MS-21), marzo 1983
9. Revista del ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento Y el Concreto), Año 1, número 1. San Salvador, junio 1996.
10. Revista del ISCYC (Instituto Salvadoreño del Cemento Y el Concreto), Año 2, número 7. San Salvador, diciembre 1997.

11. Asphalt Hot-mix Recycling, The Asphalt Institute, serie del manual No. 20 (MS-20), 1986
12. Alex Odir Canales Molina Restauración de Pavimentos Flexibles con Lechadas de Cemento Pórtland, Tesis de UES, Diciembre 2000.
13. Rogelio Antonio Aguirre Juárez, Tesis de UES, Febrero 1997. Estudio de los Métodos de Rehabilitación de pavimentos flexibles en el área Metropolitana de San Salvador.
14. Especificaciones SIECA, FP'96.
15. Asphalt Plant Manual the Asphalt Institute, segunda edición junio 1959, Serie de Manual No. 3 (MS-3)
16. Jaime Ernesto Carvajal Alvarez. Estudio y Comparación de los métodos utilizados por AASHTO-93 y El Instituto Americano del Asfalto -91 (MS-1) para el Diseño de Pavimento Flexibles. Tesis de UES, abril 1997
17. Información Técnica del Geotextil. Ministerio de Obras Públicas, UIDV, Depto. De Investigación y desarrollo.
18. Pagina de Internet del Ministerio de Obras Públicas uidv.contacto@mop.gob.sv
19. Reciclado de Pavimentos en Frío empleando emulsiones asfálticas.
Autor: Ing. Gustavo Rivera. Editorial: Alfaomega. 1997
20. Recuperación de pavimentos flexibles. Autor: Ing. Rafael Limón Limón.
México, D.F. Septiembre 1978
21. Lineamientos para el Reciclamiento de los Materiales de Pavimentación (recuperación de los materiales). Autor: John A. Epps
Reunión anual de reciclado de pavimentos en New York, USA. Octubre 25-26 de 1978

22. Presentación en Power Point proporcionada por El Ministerio de Obras Públicas.

23. Otras direcciones de internet como:

www.asphaltinstitute.org

www.highwaysmaintenance.com

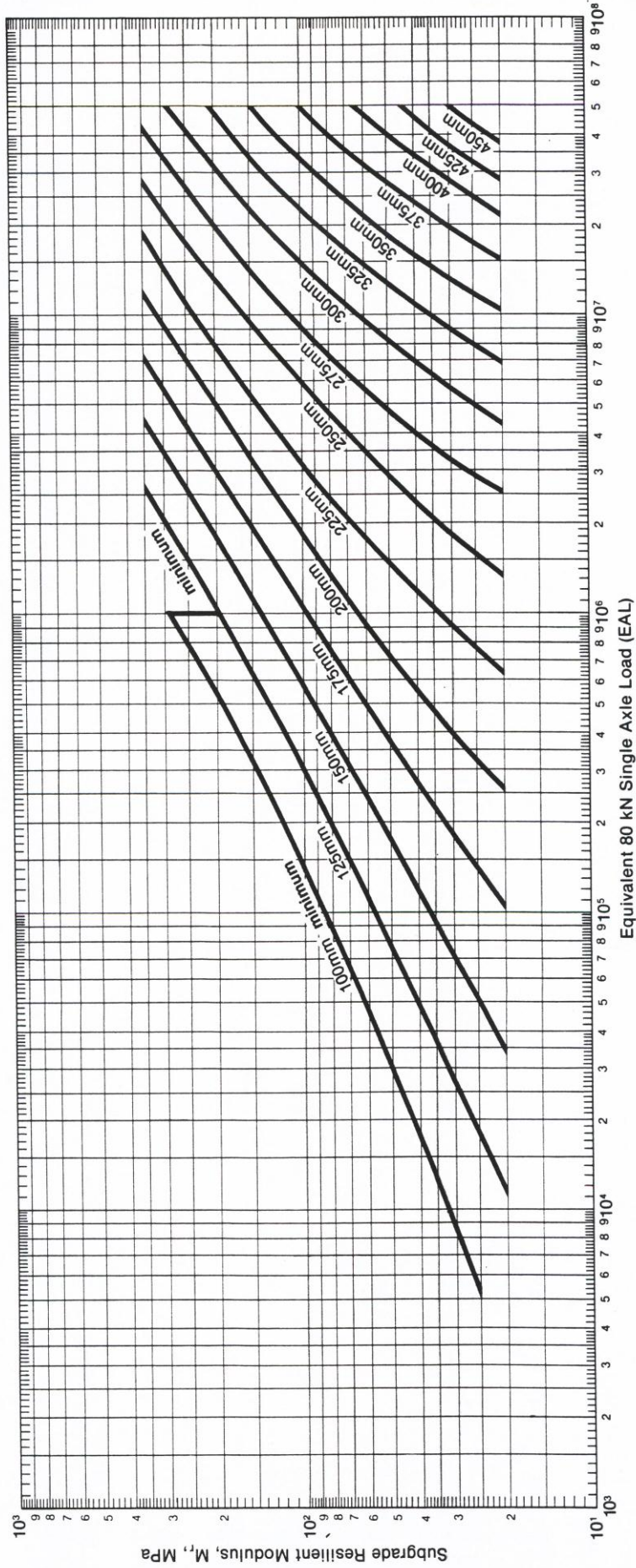
uidv.contacto@mop.gob.sv

www.faa.gov/aro/engineering/briefs/eb29.htm, entre otras.

ANEXOS

Full Depth Asphalt Concrete

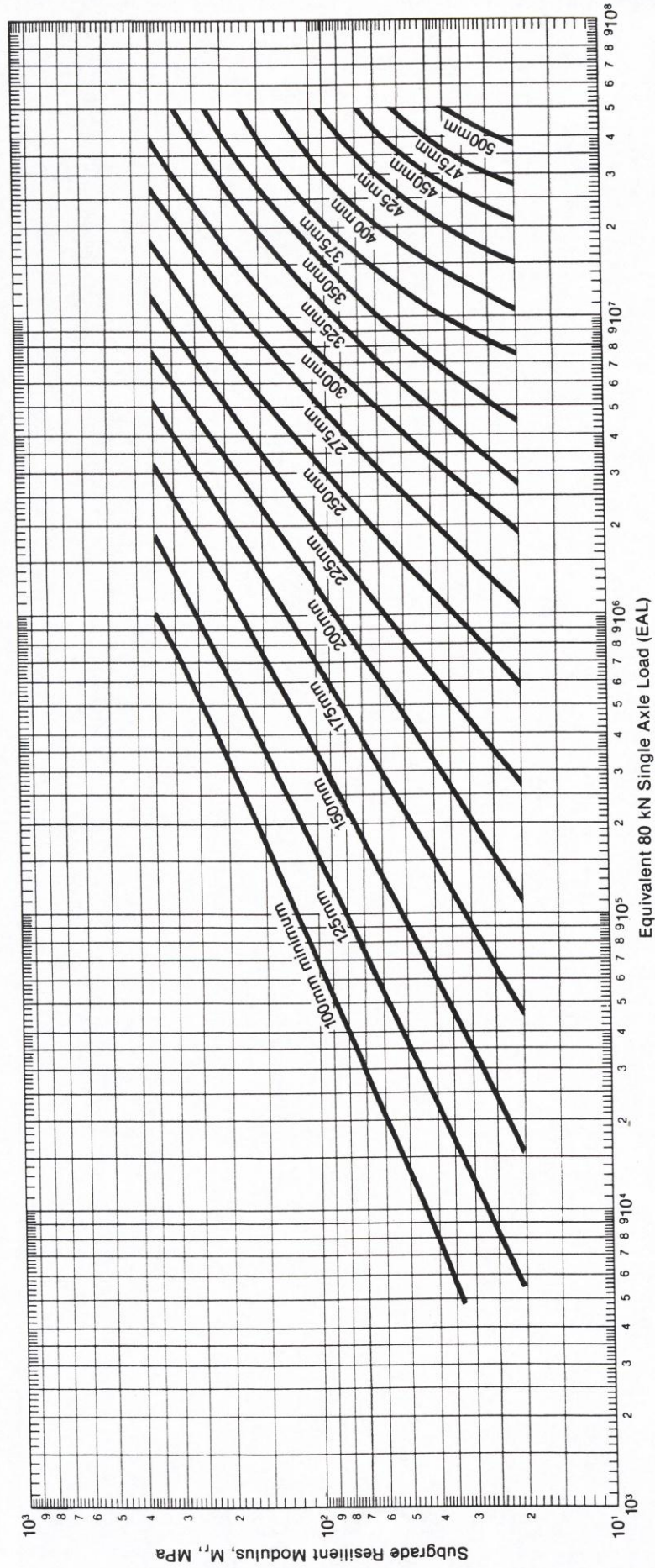
MAAT 7°C



Design Chart A-1

Full-Depth Asphalt Concrete

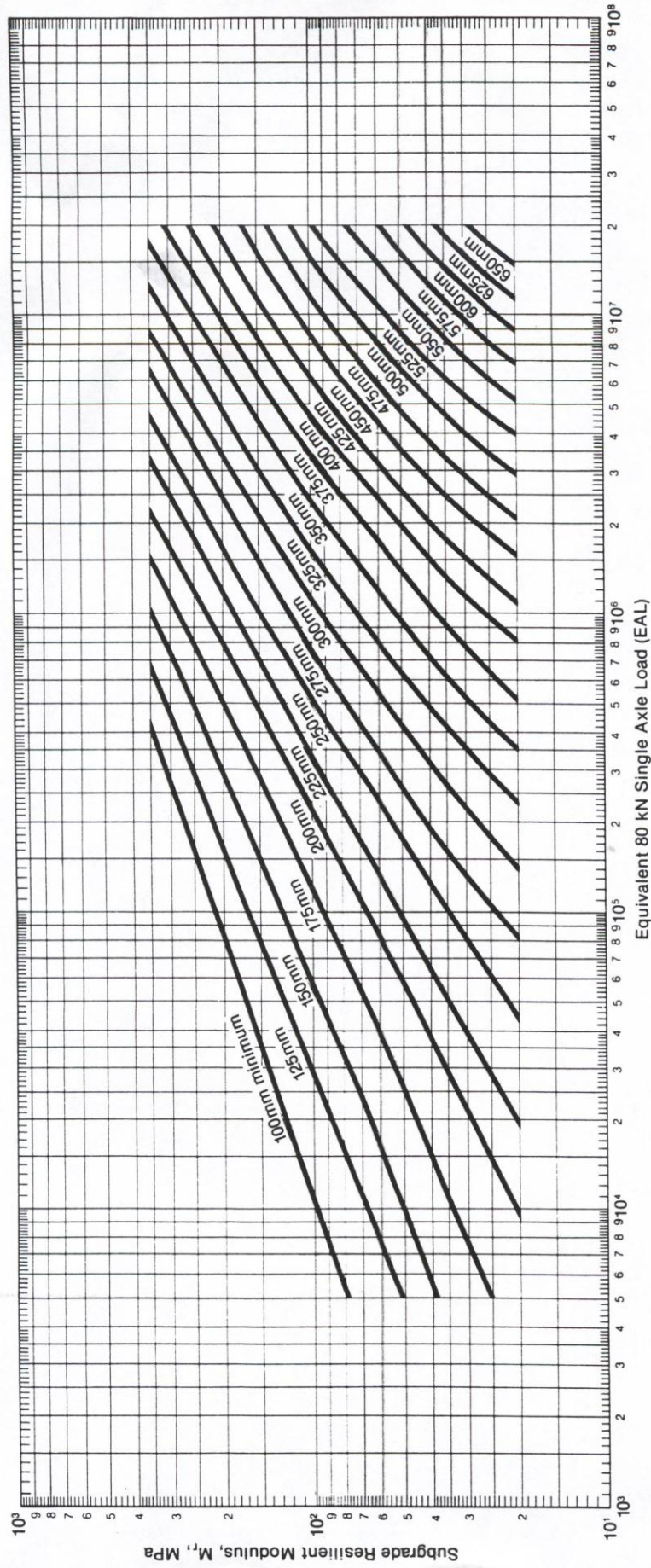
MAAT 15.5°C



Design Chart A-7

Emulsified Asphalt Mix Type III

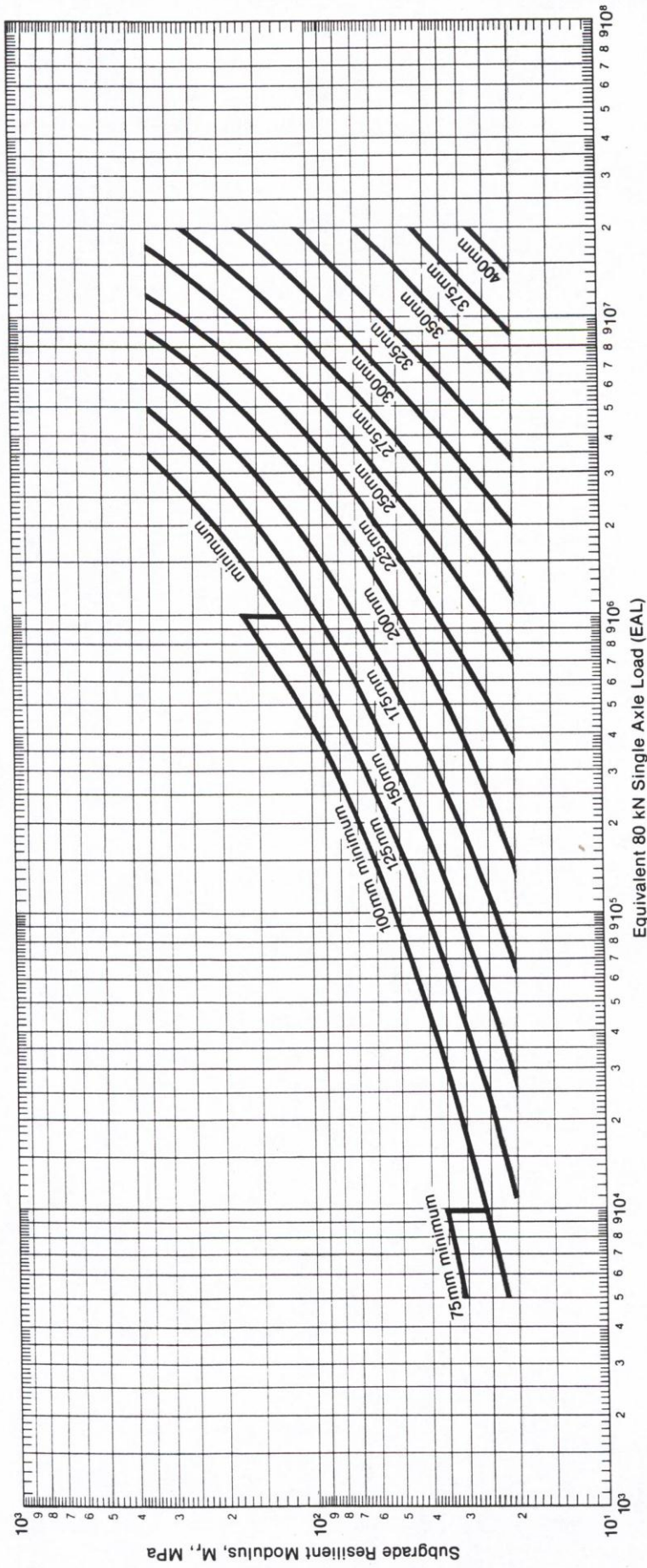
MAAT 15.5°C



Design Chart A-10

Untreated Aggregate Base 150mm Thickness

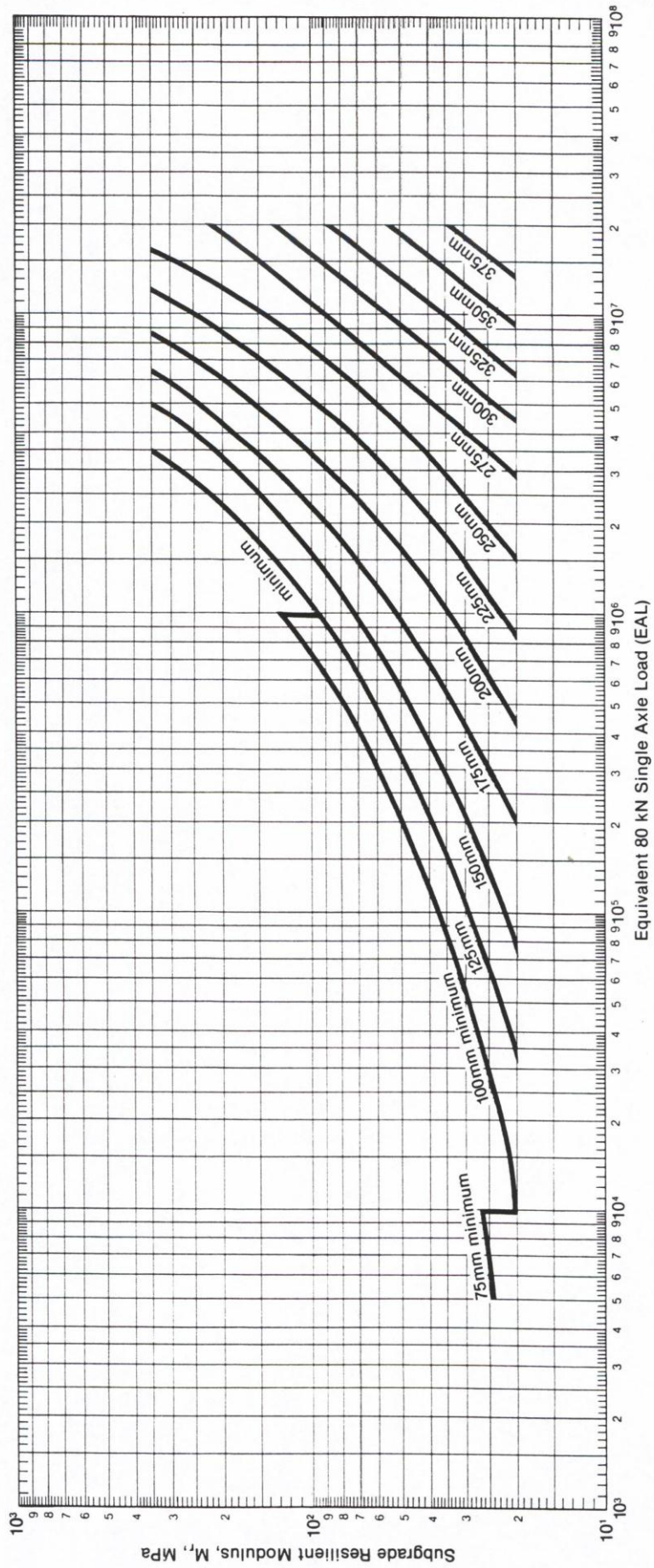
MAAT 15.5°C



Design Chart A-11

Untreated Aggregate Base 300mm Thickness

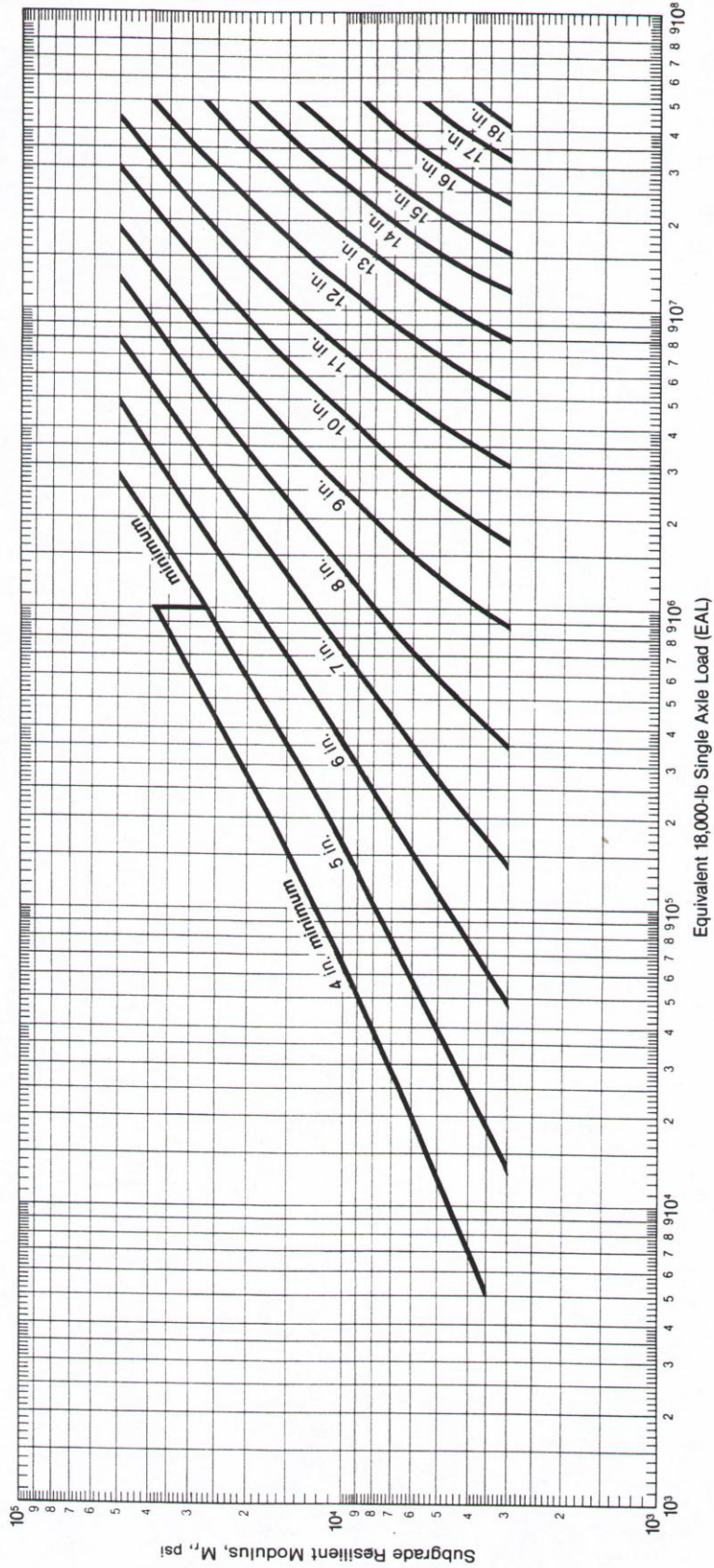
MAAT 15.5°C



Design Chart A-12

Full Depth Asphalt Concrete

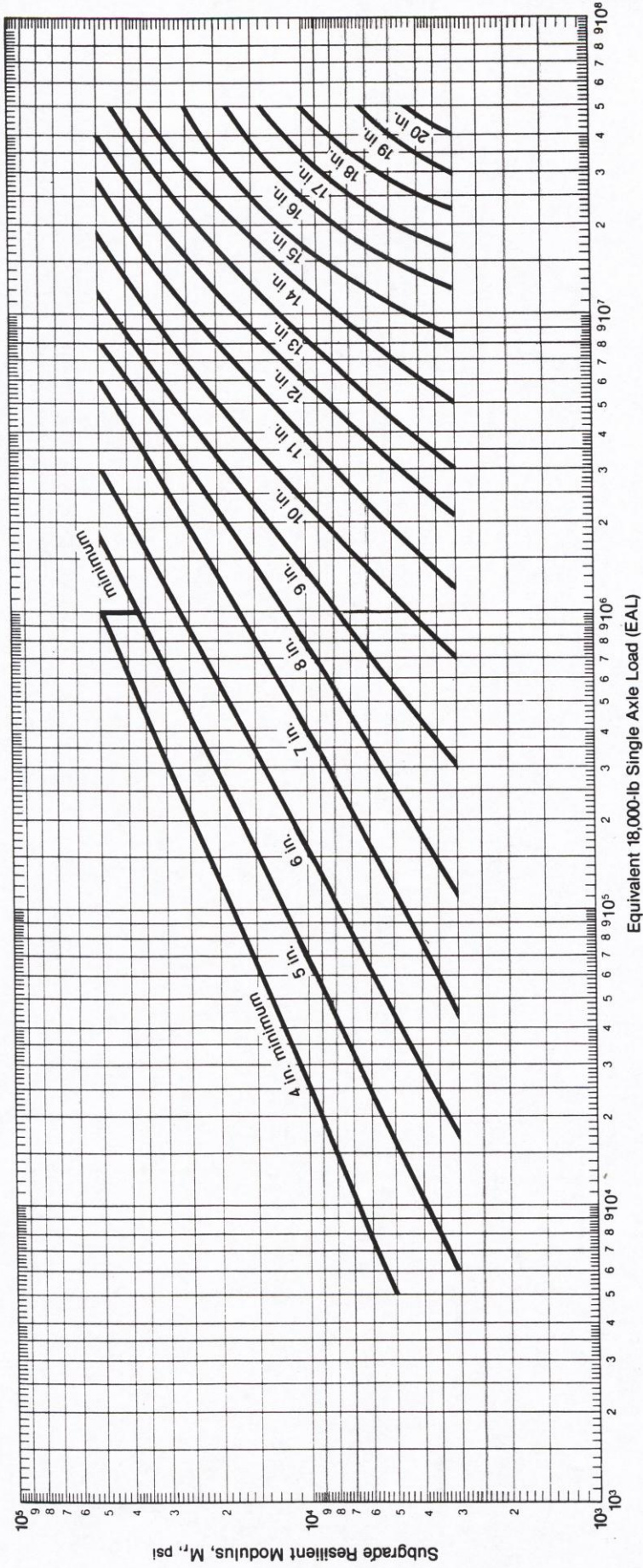
MAAT 45°F



Design Chart A-19

Full-Depth Asphalt Concrete

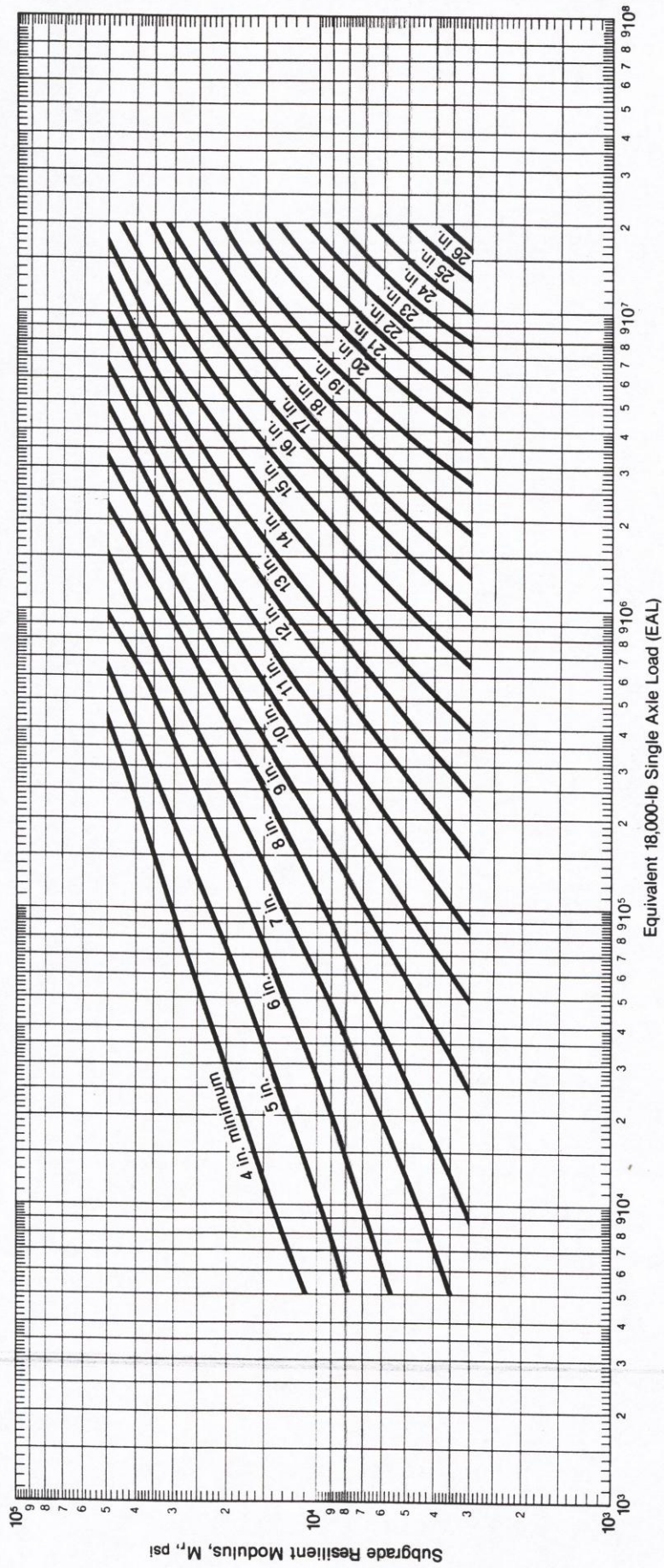
MAAT 60°F



Design Chart A-25

Emulsified Asphalt Mix Type III

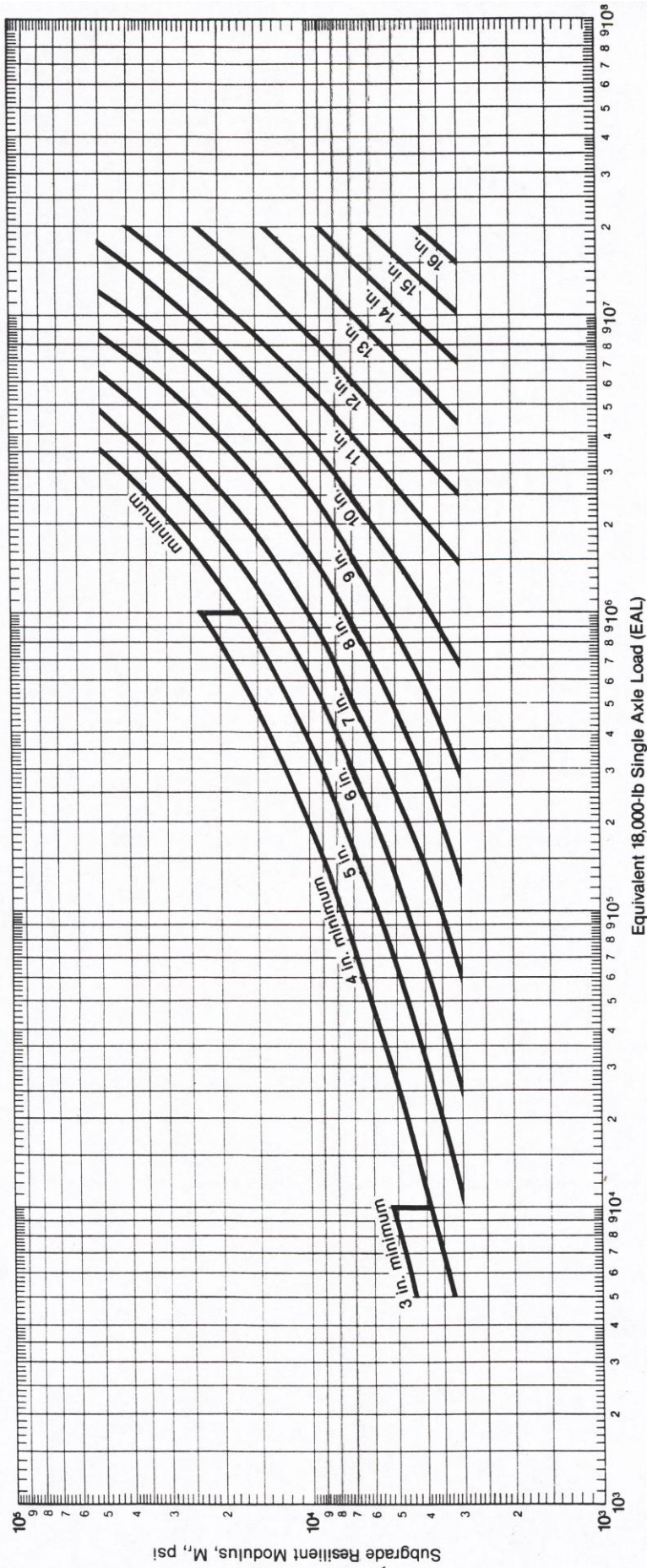
MAAT 60°F



Design Chart A-28

Untreated Aggregate Base 6.0 in. Thickness

MAAT 60°F



Design Chart A-29